République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département des Sciences de la matière

Mémoire

Présenté pour obtenir

Le Diplôme de Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique Énergétique et Énergie Renouvelable

Par

CHELLIK Nourhane
MIHOUBI Ikram

Intitulé

Etude et réalisation d'un sécheur solaire destiné aux fruits et légumes

Soutenu le : 24 Juin 2026
Devant le Jury composé de

KAHOUL Abdelhalim	Pr	Président	Université de Bordj Bou Arréridj
IMAKHLAF Anis	MCB	Encadreur	Université de Bordj Bou Arréridj
DAOUDI Salim	Pr	Encadreur	Université de Bordj Bou Arréridj
AOUKLI Zakaria	ingénieur	Co Encadreur	Manager Machine Bordj
LAMRI Sarra	MCB	Examinateur	Université de Bordj Bou Arréridj
LOUKRIZ Samia	MCA	Responsable Incubateur	Université de Bordj Bou Arréridj

Année Universitaire 2025/2026

ي

شكر والتقدير

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، نحمده سبحانه وتعالى ونشكره على ما أنعم علينا به من توفيق وإعانة لإتمام هذا العمل المتواضع

نتقدم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان إلى

أنيس إيماخلاف، سليم داودي وعوكلي زكرياء

على ما قدموه لنا من توجيهات ونصائح قيمة، وعلى دعمهم ومساعدتهم التي كان لها الأثر الكبير في إنجاز هذه المذكرة وإتمامها في أحسن الظروف

كما نتوجه بخالص الشكر والتقدير إلى أستاذنا المشرف على ما بذله من جهد في توجيهنا الموقرين على تفضلهم ومرافقتنا طوال فترة إنجاز هذا العمل، وإلى أعضاء لجنة المناقشة بقبول مناقشة هذه المذكرة وتقييمها

ولا يفوتنا أن نتقدم بالشكر إلى جميع أساتذتنا الكرام بقسم الفيزياء الطاقوية والطاقات المتجددة، الذين كان لهم الفضل في تكويننا العلمي وإثراء معارفنا طوال سنوات الدراسة

كما نتوجه بالشكر إلى عائلاتنا وأصدقائنا وكل من ساعدنا من قريب أو بعيد، ولو بكلمة تشجيع أو دعوة صادقة



إهداء

من قال: أنا لها نالها، وإن أبت أتيت بها

لم تكن هذه الرحلة سهلة، ولم يكن الطريق ممهّدًا، لكن بالإرادة والصبر تحقق الهدف

بسم الله الرحمان الرحيم

أصلي وأسلم على سيد الخلق وخاتم الأنبياء والمرسلين، سيدنا محمد ﷺ

أما بعد:

أحمد الله تعالى على توفيقه لي لإتمام هذا العمل، وأسأله أن يجعله علمًا نافعًا وخطوة مباركة في مستقبلي العلمي

إلى أمي الغالية، نبع الحنان ومصدر الدعاء الذي لا ينقطع، التي كانت سنداً لي في كل لحظة ضعف، ورفيقة دعائها الذي يضيء طريقي في كل حين... إليكِ أهدي هذا النجاح بكل حب وامتنان

وإلى أبي العزيز، رمز القوة والعطاء، الذي لم يبخل عليّ يوماً بالدعم والتشجيع، وكان حضوره في حياتي دافعاً للاستمرار رغم الصعاب... لك مني كل الشكر والوفاء.

إلى أخي العزيز "وسام الدين"، الذي كان لي سندًا ودعمًا في مسيرتي، فله مني خالص الشكر والدعاء بالتوفيق والسداد

إلى أجدادي وجداتي، وإلى جدي رحمه الله وأسكنه فسيح جناته، جزاهم الله عني خير الجزاء

شليك نورهان



إهداء

إلى كل من كلل العرق جبينه، ومن علّمني أن النجاح لا يأتي إلا بالصبر والإصرار،

إلى النور الذي أنار دربي، والسراج الذي لا ينطفئ نوره بقلبي أبداً... من بذل الغالي والنفيس واستمددتُ منه قوتي واعتزازي بذاتي... أبي

إلى من جعل الجنة تحت أقدامها، وسهّلت لي الشدائد بدعائها... إلى الإنسانة العظيمة التي لطالما تمنت أن تقر عينها في يوم كهذا... أمي

إلى ضلعي الثابت وأمان أيامي، إلى من شددتُ عضدي به فكان ينبوعاً أرتوي منه، إلى خير أيامي وصفوتها، إلى قرة عيني... أخي

كل من كان عوناً وسنداً في هذا الطريق، للأصدقاء الأوفياء ورفقاء السنين، لأصحاب الشدائد والأزمات، إلى من أفاضني بمشاعره ونصائحه المخلصة... إليكم عائلتي

أهديكم هذا الإنجاز وثمرة نجاحي الذي لطالما تمنيته، ها أنا اليوم أكملت وأتممت أول ثمراته بفضل الله سبحانه وتعالى

فالحمد لله على ما وهبني، وأن يجعلني مباركاً وأن يعينني أينما كنت، فمن قال: أنا لها نالها

وأنا لها، وإن أبت، رغماً عنها أتيت بها

فالحمد لله شكراً وحباً وامتناناً على البدء والختام

وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين

ميهوبي إكرام



Table of Contents

Chapitre I Généralités sur le gisement solaire....3
I.1 Introduction....3
I.2 Les énergies renouvelables....3
I.2.1 L'énergie solaire....3
I.2.2 L'énergie éolienne....4
I.2.3 Énergie biomasse....5
I.2.4 L'énergie géothermique....5
I.2.5 Énergie hydraulique....6
I.3 Le Gisement solaire....7
I.3.1 Soleil....7
I.3.2 Caractéristiques du soleil....8
I.3.3 Système terre-soleil....8
I.3.4 Composantes du rayonnement solaire et constant solaire....10
I.3.5 Paramètre de la position du soleil....11
I.3.6 Coordonnées géographiques d'un site à la surface de la terre....12
I.3.7 Les temps solaires....13
I.4 Synthèse bibliographique et état de l'art sur les sécheurs solaires....13
I.5 Conclusion....20
Chapitre II Théorie des capteurs solaires....20
II.1 Introduction....20
II.2 Capteurs solaires thermiques....20
II.2.1 Définition d'un capteur solaire thermique....20
II.2.2 Principe de fonctionnement d'un capteur thermique....21
II.2.3 Autres valeurs caractéristiques du capteur....22
II.2.4 Types de capteurs solaires thermiques....23
II.2.5 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire....28
II.3 Séchage....30
II.3.1 Définition du séchage....30

II.3.2 Historique....31
II.3.3 L'Objectif de séchage....31
II.3.4 Types de séchage....31
II.3.5 L'utilisation du séchage dans les industries agroalimentaires....37
II.3.6 Habitudes de séchage en Algérie....37
II.3.7 Les domaines d'utilisation....38
II.3.8 Les avantages et les inconvénients de séchage....38
II.4 Conclusion....39
Chapitre III Dispositif expérimental....40
III.1 Description du séchoir solaire réalisé....40
III.2 Matériaux utilisés....41
III.3 Avantages du séchoir réalisé....41
III.4 Réalisation du séchoir solaire intelligent....42
Chapitre IV Résultats et Discussion....48
IV.1 Introduction....48
IV.2 Présentation et analyse des résultats....48
IV.3 Conclusion....55
Bibliographie

LISTE DE FIGURES

Figure I.1 : Exemple de modules de production d'énergie solaire. 4
Figure I.2 : L'énergie éolienne....4
Figure I.3 : Principe produisant l'énergie de la biomasse....5
Figure I.4 : Schéma du principe de production de l'énergie géothermique....6
Figure I.5 : Schéma du principe de production de l'énergie hydraulique....6
Figure I.6 Structure du soleil 7
Figure I.7 Mouvement de la terre autour du soleil....9
Figure I.8 Mouvement apparent du soleil....10
Figure I.9 Rayonnement direct, diffus, global et albédo....10
Figure I.10 Paramètres de la position du soleil....12
Figure I.11 Coordonnées terrestres. 13
Figure II.1 Réflexion des faisceaux lumineux sur un vitrage et déperditions de chaleur d'un capteur....21
Figure II.2 Schématisation du principe de captation du rayonnement solaire. 22
Figure II.3 Schéma de principe d'un concentrateur cylindre-parabolique. 23
Figure II.4 Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel. 24
Figure II.5 Schéma de principe d'un concentrateur parabolique....24
Figure II.6 Schéma de principe d'une centrale à tour....25
Figure II.7 Schéma du capteur solaire sous vide. 26
Figure II.8 Capteur plan. 27
Figure II.9 Les différents échanges thermiques dans un capteur. 28
Figure II.10 Les fruits séchés....30
Figure II.11 Exemple d'une étuve universelle XU....32
Figure II.12 Lyophilisateur Pilote LPCCPLS15 et Lyophilisateur de Production 32
Figure II.13 Illustration d'un séchoir solaire 33
Figure II.14 Schéma représentatif des types de séchoirs solaires....34
Figure II.15 séchoir solaire direct. 34
Figure II.16 séchoir solaire indirect....35
Figure II.17 Principe du séchage par micro-ondes (UHF)....36
Figure II.18 Technique de séchage solaire des figues par la femme Algérienne 37
Figure III.1 Modèle 3D du séchoir solaire intelligent....42
Figure III.2 Réalisation de la chambre de séchage 43
Figure III.3 Réalisation du capteur solaire....44
Figure III.4 Système de commande et de communication du séchoir solaire 45
Figure III.5 Préparation des essais expérimentaux de séchage de la banane....46
Figure III.6 Prototype final du séchoir solaire 47
Figure IV.1 Évolution des rendements du collecteur, du séchoir et du rendement global en fonction du temps avant stockage. 48
Figure IV.2 Évolution de l'humidité relative de l'air dans la chambre de séchage....49

Figure IV.3 Variation des rendements du collecteur, du séchoir et du rendement global en fonction de l'irradiation solaire avant stockage.....50
Figure IV.4: Rendement en fonction de temps 51
Figure IV.5 Évolution des températures T1, T2 et T3 au cours de la journée.....52
Figure IV.6 Variation de l'humidité relative en fonction du temps.....52
Figure IV.7 Évolution simultanée de l'irradiation solaire et des rendements du système de séchage solaire. 53
Figure IV.8 Comparaison du rendement global du séchoir avec et sans stockage thermique..54

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
G	Rayonnement globa	W/m^2
S	Rayonnement diffus	W/m^2
D	Rayonnement direct	W/m^2
C	Constante solaire	W/m^2
I_0	Valeur moyenne de la constante solaire	W/m^2
j	Numéro du jour de l'année	_
Ψ	Azimut solaire	degré
γ	Angle de hauteur solaire	degré
z	Distance zénithale	degré
θ	Latitude géographique	degré
ϕ	Longitude géographique	degré
δ	Déclinaison solaire	degré
ω	Angle horaire	degré
TSV	Temps solaire vrai	h
TSM	Temps solaire moyen	h
Et	Équation du temps	min
N	Numéro du jour dans l'année	_
q	Flux thermique	W
k	Conductivité thermique	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
A	Surface d'échange	m^2
h	Coefficient de convection	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
T_p	Température de la paroi	°C ou K
T_f	Température du fluide	°C ou K
ε	Émissivité thermique	_
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
T	Température absolue	k
AW	Activité de l'eau	_

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى إبراز أهمية الطاقة الشمسية الحرارية في تطبيقات التجفيف الزراعي، مع التركيز على المجففات الشمسية الذكية المخصصة لتجفيف الخضر والفواكه. تم تناول المورد الشمسي وخصائص الإشعاع الشمسي والعوامل المؤثرة في استغلاله، بالإضافة إلى دراسة المجمعات الشمسية الحرارية ومبادئ عملها وأنواعها المختلفة. كما تم التطرق إلى عملية التجفيف وأهميتها في حفظ المنتجات الزراعية وتحسين مدة تخزينها.

اعتمدت الدراسة على مراجعة الأعمال الحديثة المتعلقة بالمجففات الشمسية الذكية وأنظمة المراقبة والتحكم باستخدام الحساسات وتقنيات إنترنت الأشياء. وأظهرت النتائج أن دمج هذه التقنيات يساهم في تحسين كفاءة التجفيف، والحفاظ على جودة المنتجات، وتقليل استهلاك الطاقة، مما يجعل المجففات الشمسية الذكية حلاً مستداماً وفعالاً للقطاع الزراعي.

Résumé:

Ce mémoire vise à mettre en évidence l’importance de l’énergie solaire thermique dans les applications de séchage agricole, en particulier à travers les séchoirs solaires intelligents destinés au séchage des fruits et légumes. L’étude présente les caractéristiques du rayonnement solaire, les paramètres influençant son exploitation ainsi que les principes de fonctionnement et les différents types de capteurs solaires thermiques. Le procédé de séchage et son rôle dans la conservation des produits agricoles ont également été abordés.

Une revue bibliographique des travaux récents sur les séchoirs solaires intelligents intégrant des capteurs et des technologies IoT a été réalisée. Les résultats montrent que ces systèmes permettent d’améliorer les performances du séchage, de préserver la qualité des produits et de réduire la consommation énergétique, offrant ainsi une solution durable pour le secteur agricole.

Abstract:

This study highlights the importance of solar thermal energy in agricultural drying applications, with a particular focus on intelligent solar dryers for fruits and vegetables. It presents the characteristics of solar radiation, the factors affecting solar energy utilization, and the operating principles of solar thermal collectors. The drying process and its role in preserving agricultural products are also discussed.

A literature review of recent research on intelligent solar dryers integrating sensors and Internet of Things (IoT) technologies was conducted. The findings indicate that these systems improve drying efficiency, maintain product quality, and reduce energy consumption, making them a sustainable and effective solution for agricultural applications.

Introduction générale

Dans un contexte marqué par l'augmentation de la demande énergétique mondiale et les préoccupations croissantes liées à la protection de l'environnement, les énergies renouvelables occupent une place de plus en plus importante dans les stratégies de développement durable. Parmi ces ressources, l'énergie solaire se distingue par son abondance, sa disponibilité et son caractère propre. Grâce à ces avantages, elle est aujourd'hui largement exploitée dans différentes applications thermiques et électriques, notamment dans les secteurs agricole, industriel et domestique. L'utilisation de l'énergie solaire contribue non seulement à la réduction de la consommation des combustibles fossiles, mais également à la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

Le secteur agricole représente l'un des domaines où l'énergie solaire peut offrir des solutions efficaces et économiques. En effet, la conservation des produits agricoles après récolte constitue un défi majeur en raison des pertes importantes causées par l'humidité et les méthodes de stockage inadéquates. Le séchage est l'une des techniques les plus utilisées pour prolonger la durée de conservation des produits tout en préservant leur qualité. Cependant, les méthodes traditionnelles de séchage présentent plusieurs limites liées aux conditions climatiques, au manque de contrôle des paramètres de fonctionnement et aux risques de contamination. Dans ce cadre, notre travail porte sur l'étude et la conception d'un séchoir solaire intelligent destiné au séchage des fruits, légumes et autres produits agricoles. Le système proposé repose sur l'utilisation d'un capteur solaire thermique associé à un système de stockage de chaleur ainsi qu'à une plateforme intelligente basée sur l'Internet des Objets (IoT), permettant la surveillance et le contrôle à distance des paramètres de séchage afin d'améliorer les performances du système et la qualité des produits obtenus.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur l'énergie solaire et le gisement solaire, ainsi qu'une synthèse bibliographique sur les séchoirs solaires. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des capteurs solaires thermiques et aux techniques de séchage solaire. Le troisième chapitre décrit la conception, la réalisation et les différents éléments constituant le prototype du séchoir solaire intelligent. Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus, afin d'évaluer les performances du système proposé.

Chapitre I :
Généralités sur le gisement solaire

Chapitre I Généralités sur le gisement solaire

I.1 Introduction

L'une des sources d'énergie renouvelable particulièrement visible en tous points de vue est le soleil; son utilisation se prête facilement. Comme d'autres types d'approvisionnement énergétique autre que thermique, sa possession met toujours le destinataire dans une position où il peut satisfaire à part ses besoins en énergie. Par exemple, il est absolument nécessaire de savoir où se situe le Soleil dans le ciel du monde à tout moment et en tout lieu. Selon l'heure du jour et de nuit de l'élévation du Soleil ainsi que son chemin dans le ciel, on peut avoir une idée à l'avance de la quantité de différentes quantités [1].

Dans cette section, les sources d'énergie renouvelable nous mettront en scène les quantités solaires les plus importantes et les définirons:

- Les grandeurs astronomiques.
- Les grandeurs géographiques.
- Le rayonnement solaire hors atmosphère.
- Le rayonnement direct, diffus et global.

I.2 Les énergies renouvelables

I.2.1 L'énergie solaire

L'énergie solaire, c'est l'énergie qui vient directement du soleil. Elle est très utile parce qu'elle est disponible naturellement et sans coût. Pour en profiter, on distingue généralement deux façons : les systèmes actifs et les systèmes passifs.

Les systèmes actifs utilisent des appareils pour récupérer l'énergie du soleil et l'utiliser. Par exemple, il y a des panneaux qui produisent directement de l'électricité. D'autres servent juste à chauffer l'eau ou les maisons. On trouve aussi des systèmes avec des miroirs qui concentrent les rayons du soleil pour obtenir une forte chaleur, qu'on peut ensuite utiliser pour produire de l'électricité. Il existe même des fours solaires qui fonctionnent avec ce principe.

Les systèmes passifs sont les plus simples, puisqu'ils ne demandent pas d'équipements particuliers. Ils dépendent surtout de la manière dont le bâtiment est conçu, par exemple son orientation par rapport au soleil ou les matériaux utilisés. Grâce à cela, on peut utiliser naturellement la lumière et la chaleur du soleil à l'intérieur, sans avoir besoin de systèmes compliqués [2].



Figure I.1 : Exemple de modules de production d'énergie solaire.

I.2.2 L'énergie éolienne

L'énergie du vent fait partie des énergies renouvelables et ne produit pas de pollution. Elle représente un complément intéressant à l'électricité fournie par les centrales thermiques et nucléaires. Les statistiques montrent que seulement 18 % de l'énergie mondiale provient des sources renouvelables, et parmi elles, les éoliennes ne contribuent qu'à hauteur de 1,8 %. Malgré cela, le secteur de l'énergie éolienne se développe rapidement [3].



Figure I.2 : L'énergie éolienne**.**

I.2.3 Énergie biomasse

La biomasse correspond à toute matière organique provenant des plantes ou des animaux. Elle peut se trouver dans les forêts, les zones marines et aquatiques, les haies, les parcs et les jardins, ou encore dans les déchets et coproduits générés par certaines industries [4].

Dans une centrale à biomasse, la combustion de cette matière produit de la vapeur qui fait tourner une turbine. L'alternateur relié transforme cette énergie mécanique en électricité, que le transformateur peut ensuite adapter pour la faire circuler facilement dans les lignes à moyenne et haute tension [5].

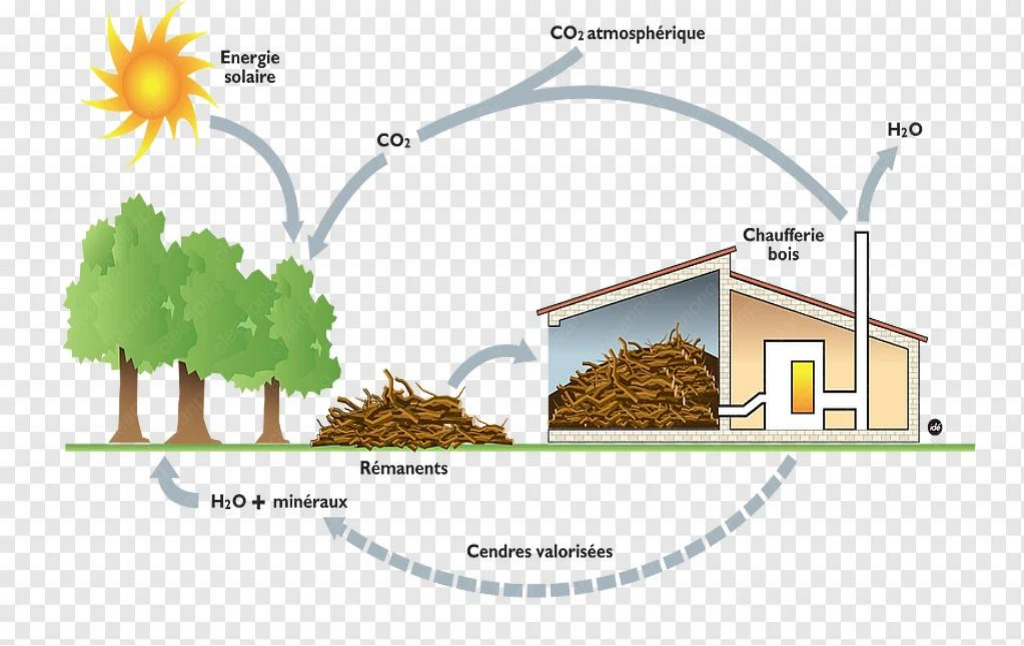


Figure I.3 : Principe produisant l'énergie de la biomasse.

I.2.4 L'énergie géothermique

L'énergie géothermique vient de la chaleur naturellement présente sous la surface de la Terre. Parfois, cette chaleur se manifeste à travers des volcans ou des geysers, mais on peut aussi y accéder à tout moment, par exemple grâce aux sources d'eau chaude. On peut utiliser cette énergie pour produire de l'électricité ou pour chauffer et refroidir des bâtiments. Elle est récupérée soit à partir de réservoirs très profonds accessibles par forage, soit à partir de réservoirs situés plus près de la surface [6].

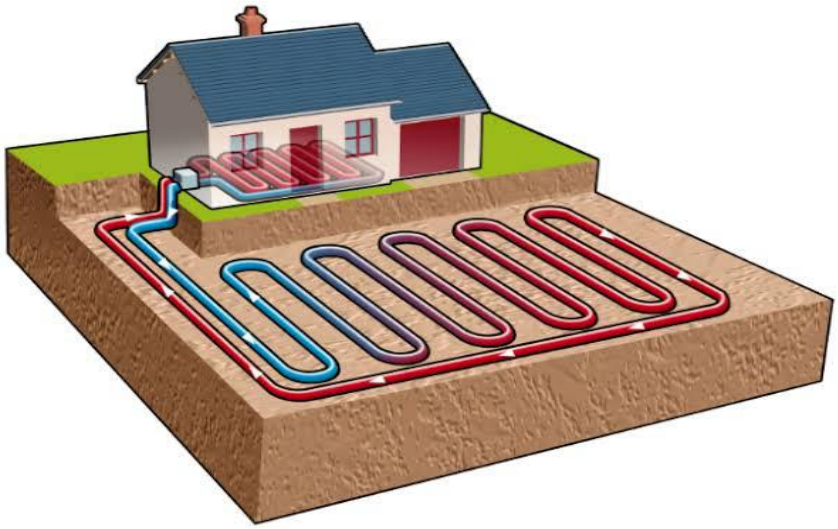


Figure I.4 : **Schéma du principe de production de l'énergie géothermique.**

I.2.5 Énergie hydraulique

L'électricité hydroélectrique vient de l'eau qui bouge. Les rivières, les fleuves, les cascades et les courants marins peuvent produire cette énergie. L'eau fait tourner des turbines, et cette force devient de l'électricité [7].

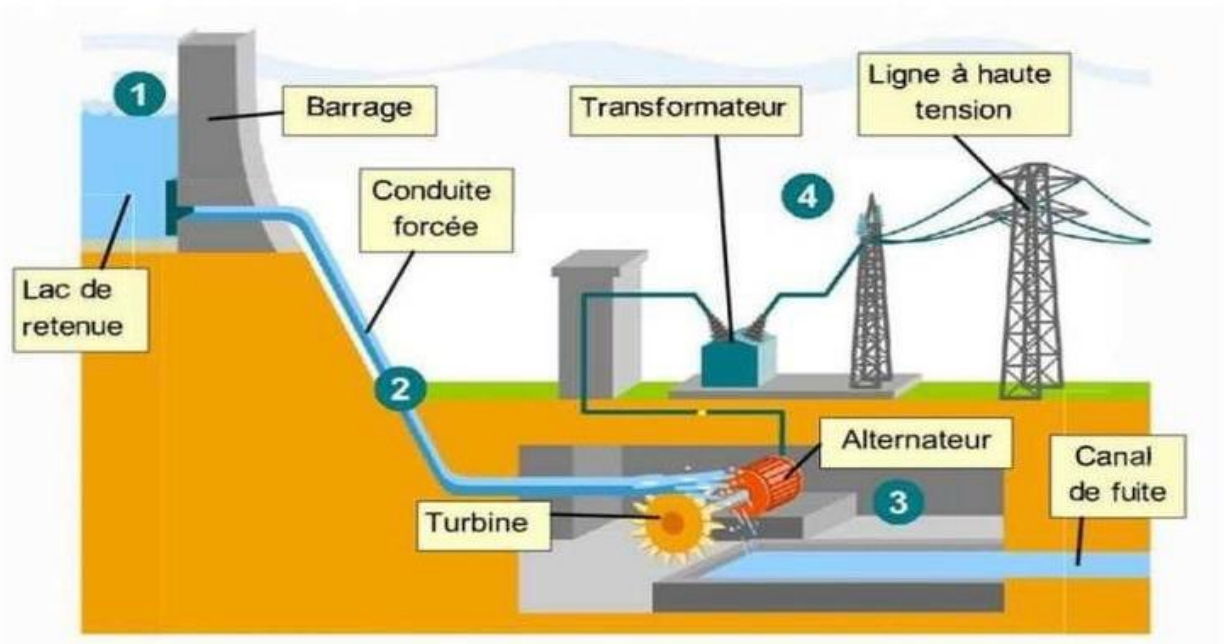


Figure I.5 : Schéma du principe de production de l'énergie hydraulique.

I.3 Le Gisement solaire

I.3.1 Soleil

Le Soleil est l'étoile située au centre du système solaire. La lumière qu'il émet met environ huit minutes pour nous atteindre. Pour la vie sur notre planète, il est indispensable, car il fournit la chaleur et l'énergie nécessaire au maintien des écosystèmes et à toutes les formes de vie. On peut imaginer le soleil comme une énorme boule de gaz brûlants. Il est composé principalement d'hydrogène (80 %) et d'hélium (19 %), tandis que le reste, environ 1 %, comprend un mélange d'une centaine d'éléments chimiques connus. Même s'il n'est pas l'un des plus grands astres de l'univers, sa masse représente à elle seule presque toute celle du système solaire, soit 99,9 %, et sa gravité influence directement le mouvement des planètes, comètes et autres corps célestes. Le rayon moyen du soleil est d'environ 700 000 km et son âge est estimé à cinq milliards d'années, avec une durée de vie restante similaire. La température à sa surface varie entre 3 500 et 5 900 °C, faisant de lui une source inépuisable de lumière et de chaleur [8].

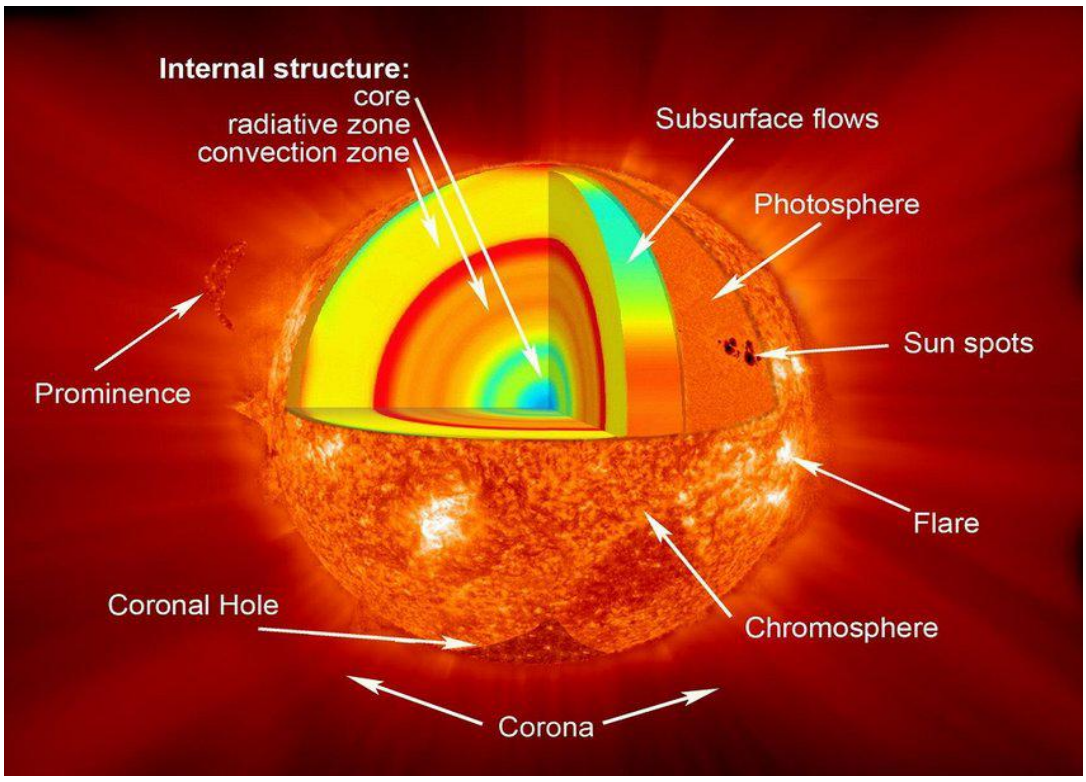


Figure I.6 Structure du soleil

Le soleil est très important pour les humains. Il donne beaucoup d'énergie qui permet à l'eau de rester liquide et aux plantes de faire la photosynthèse. Le soleil influence aussi le climat et le temps que nous voyons chaque jour [9].

I.3.2 Caractéristiques du soleil

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau

Table I-1 Caractéristiques principales du soleil

Caractéristiques	Valeurs
Diamètre (km)	$1{,}392\times10^{6}$
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (km^2)	$6{,}09\times10^{12}$
Volume (km^3)	$1{,}41\times10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m^3)	1408
Vitesse (km/s)	217
Température au centre (MK)	16
Température à la surface (K)	5900

I.3.3 Système terre-soleil

I.3.3.1 Mouvements de la terre autour du soleil

La Terre suit une orbite en forme d'ellipse autour du Soleil, qui occupe l'un des deux points focaux. Chaque année, elle complète ce trajet en un peu plus de 365 jours, en avançant dans le plan appelé l'écliptique. Au fil des saisons, la distance entre notre planète et le Soleil varie : elle est minimale en hiver, vers le 21 décembre, et atteint environ 147 millions de kilomètres. À l'inverse, en été, autour du 22 juin, cette distance s'allonge jusqu'à 152 millions de kilomètres. Les journées du 21 mars et du 21 septembre sont des moments particuliers où la durée du jour et de la nuit est identique, connus sous le nom d'équinoxes. En parallèle, la Terre effectue une rotation complète sur elle-même chaque jour. Cette rotation se fait autour d'un axe imaginaire reliant les pôles, et elle crée le cycle quotidien du jour et de la nuit. Le cercle imaginaire situé à mi-chemin entre les pôles, perpendiculaire à cet axe, constitue l'équateur. Enfin, cet axe n'est pas vertical par rapport à l'écliptique : il présente une inclinaison de 23°27', responsable de l'alternance des saisons [10].

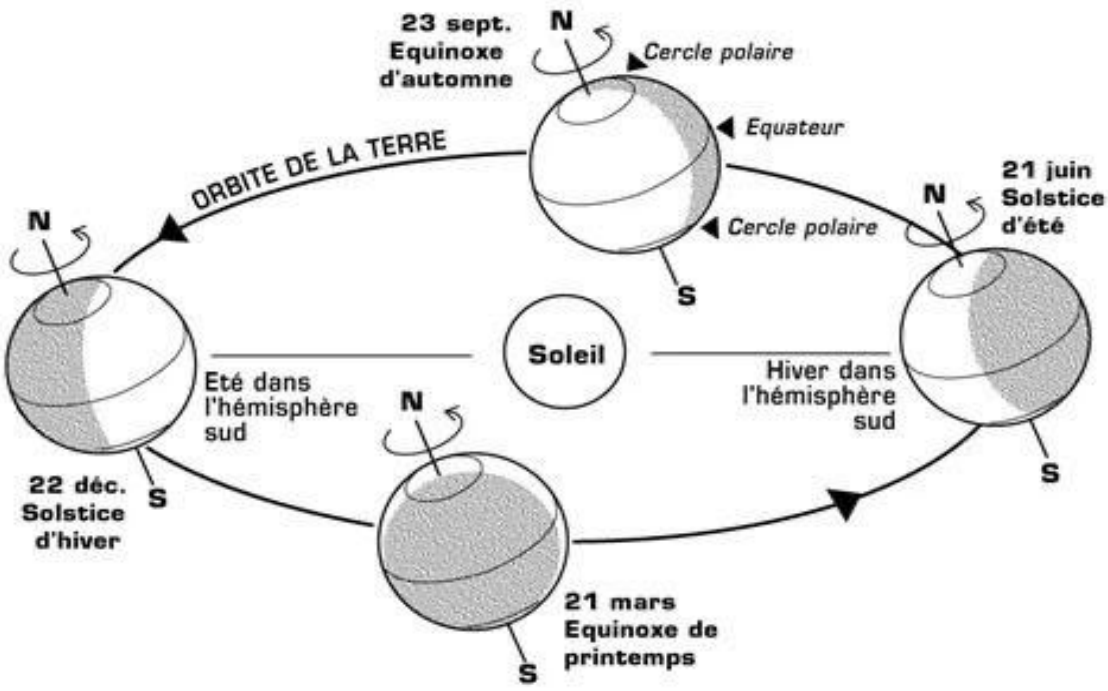


Figure I.7 Mouvement de la terre autour du soleil.

I.3.3.2 Mouvement apparent du soleil

Le Soleil semble se déplacer dans le ciel au cours de la journée lorsqu'on l'observe depuis la Terre. Ce phénomène est appelé mouvement apparent du Soleil.

Hors des zones polaires, de l'équateur et des tropiques :

- **Le matin**, le Soleil apparaît à l'est, proche de l'horizon, marquant ce que l'on appelle le lever du Soleil.
- **À midi solaire**, il atteint sa position la plus haute dans le ciel, généralement vers le sud ou le nord selon l'hémisphère.
- **Le soir**, le Soleil descend vers l'ouest, près de l'horizon, ce qui correspond au coucher du Soleil.

Pour un observateur situé à une latitude L au nord de l'équateur, la position du Soleil à midi se schématise par l'angle formé entre sa direction et la verticale du lieu, qui est égal à (L – δ), où δ représente la déclinaison solaire. La durée du jour varie au cours de l'année : elle est exactement de 12 heures lors des équinoxes, inférieure à 12 heures entre le 21 septembre et le 21 mars, et supérieure à 12 heures entre le 21 mars et le 21 septembre [10].

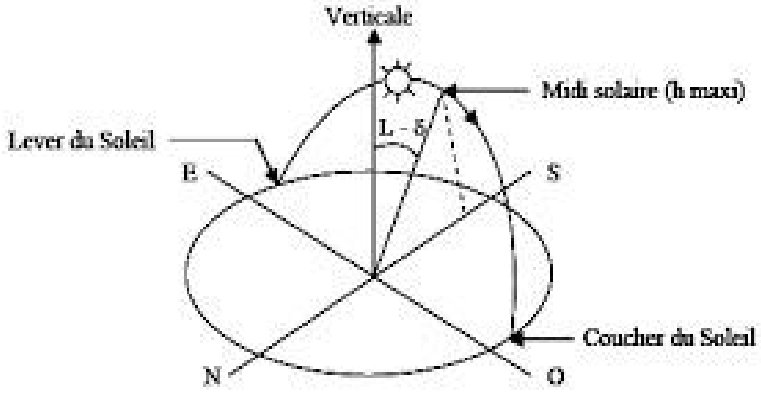


Figure I.8 Mouvement apparent du soleil

I.3.4 Composantes du rayonnement solaire et constant solaire

I.3.4.1 Les composantes du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie électromagnétique émise par le soleil, subit de fortes modifications en traversant l'atmosphère. Ainsi, seule une partie de ce rayonnement atteint réellement le sol, principalement sous forme de rayonnement direct et de rayonnement diffus, qui sont les plus importants. Une autre partie du rayonnement global est renvoyée par la surface terrestre, appelée albédo, comme cela peut être illustré dans la figure correspondante.

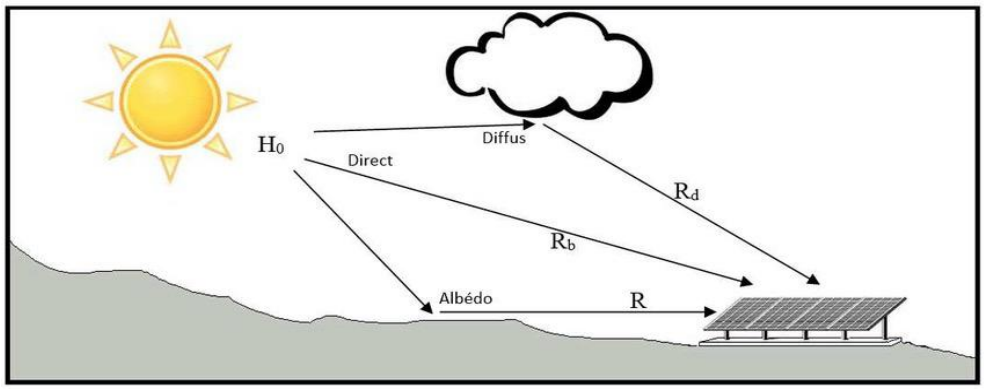


Figure I.9 Rayonnement direct, diffus, global et albédo.

- **Rayonnement direct (D)**

Le rayonnement direct correspond à la part de l'énergie solaire qui arrive au sol directement depuis le soleil, sans être diffusée par l'atmosphère. Les rayons qui le composent sont pratiquement parallèles, ce qui permet de les capter facilement à l'aide de dispositifs optiques de concentration [11].

- **Rayonnement diffus (S)**

Le rayonnement diffus est la partie du rayonnement solaire qui est modifiée lorsqu'elle traverse l'atmosphère. Les obstacles comme les nuages ou la poussière changent la direction des rayons qui étaient parallèles à l'origine. Ces rayons se dispersent alors et se propagent dans différentes directions, ce qui diminue la quantité de lumière directe mais éclaire toujours la Terre de manière diffuse. [11].

- **Rayonnement réfléchi (Albédo)**

Le rayonnement réfléchi par le sol constitue ce que l'on appelle l'albédo. Sa valeur dépend directement du type de surface, comme le sable ou la neige, et chaque surface possède son propre coefficient d'albédo. Ainsi, le rayonnement reçu au sol se compose toujours d'au moins deux parties : une partie diffuse et une partie directe. [11].

- **Le rayonnement global (G)**

Le rayonnement global correspond à la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. C'est ce rayonnement qui est utilisé pour évaluer le rendement des cellules photovoltaïques [12].

$$\boldsymbol{G = S + D} \qquad \text{(I-1)}$$

Avec :

G : rayonnement global

S: Rayonnement diffus

D: rayonnement direct

I.3.4.2 Constante solaire

La constante solaire représente la quantité totale d'énergie que le Soleil envoie à la limite de l'atmosphère terrestre, mesurée sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires [13].

Les variations de cette constante suivent la relation suivante [14] :

$$\boldsymbol{C = I_0\,[1 + 0{,}033\ \cos\ (0{,}984 j)\ ]} \qquad \text{(I-2)}$$

C: la constante solaire.

$\mathbf{I_0}$ =1361 w/m^2 est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue

j: le numéro du jour de l'année.

I.3.5 Paramètre de la position du soleil

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes :

- **l'azimut ψ**

L'azimut est l'angle formé entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction du sud. Il se mesure de 0° à 360°, en partant du sud dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. La formule permettant de calculer l'azimut est indiqué ci-dessous [15] :

$$\cos\psi = (\sin\gamma \ \sin\theta - \sin\delta)/\cos\gamma \ \cos\theta \quad \text{(I-3)}$$

- **L'angle de la hauteur solaire**

L'angle de hauteur solaire correspond à l'angle formé entre la direction du Soleil et le plan horizontal. Il peut varier de 0° à 90° lorsque l'on se dirige vers le zénith, et de 0° à -90° lorsqu'on se dirige vers le nadir. La méthode de calcul de cet angle est présentée ci-dessous [15] :

$$\sin\gamma = \sin\theta \ \sin\delta + \cos\theta \ \cos\delta \ \cos\omega \quad \text{(I-4)}$$

- **La distance zenithale z**

L'angle d'inclinaison, noté z, est défini comme l'angle formé entre la direction du Soleil et la verticale du lieu, c'est-à-dire le zénith. Il est complémentaire de l'angle de hauteur solaire γ [15].

$$\cos z = \sin\theta \ \sin\delta + \cos\delta \ \cos\theta \ \cos\omega \quad \text{(I-5)}$$

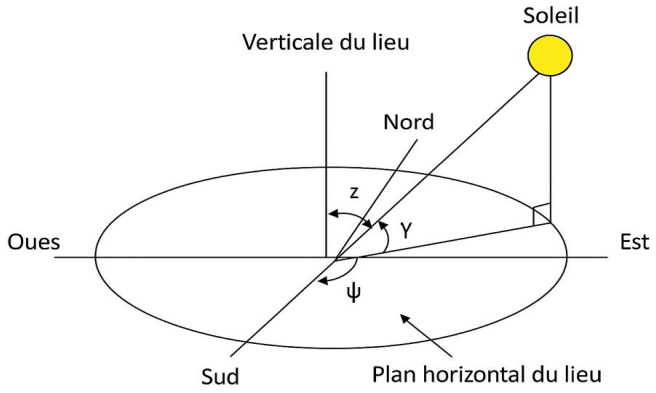


Figure I.10 Paramètres de la position du soleil

I.3.6 Coordonnées géographiques d'un site à la surface de la terre

Pour repérer un endroit précis sur la Terre, on utilise quelques mesures simples :

a) La latitude θ : c'est l'angle entre la verticale du lieu et le plan de l'équateur. Si θ est positif, le lieu est dans l'hémisphère nord ; sinon, il est dans l'hémisphère sud.

b) La longitude φ : c'est l'angle entre le méridien de Greenwich et celui du lieu. La longitude va de -180° à +180°. Comme la Terre fait un tour complet en 24 heures (360°), chaque heure correspond à 15° de longitude, et donc chaque degré équivaut à 4 minutes.

c) L'altitude : c'est la distance verticale en mètres entre le point et le niveau moyen de la mer, qui sert de référence [16].

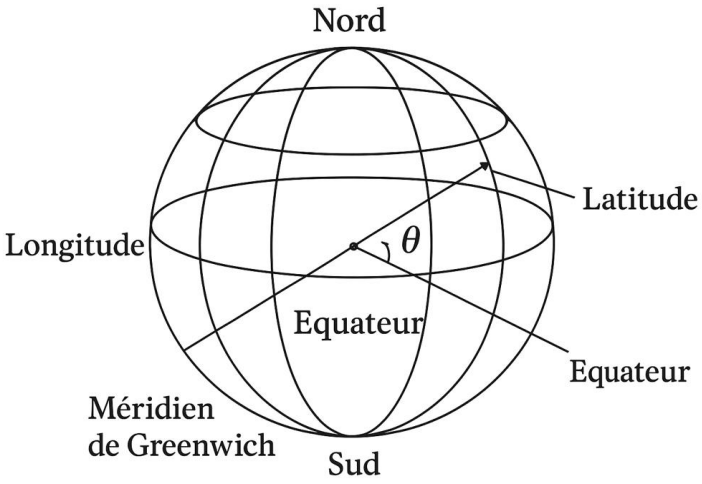


Figure I.11 Coordonnées terrestres.

I.3.7 Les temps solaires

I.3.7.1 Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, pour un instant et un emplacement précis, correspond à l'angle horaire du Soleil w. Il se présente sous la forme suivante [17] :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad \text{(I-6)}$$

I.3.7.2 Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)

Le temps solaire moyen, parfois désigné comme temps local, est déterminé par la relation suivante [17] :

$$TSM = TSV - Et \quad \textbf{(I-7)}$$

$$Et = 9{,}87 \sin\left[2 . \frac{360}{365}(N-81)\right] - 7{,}53 \cos\left[\frac{360}{365}(N-81)\right] - 1{,}5 \sin\left[\frac{360}{365}(N-81)\right] \quad \textbf{(I-8)}$$

Et : est l'équation du temps exprimée en minutes.

N: est le numéro du jour dans l'année.

I.4 Synthèse bibliographique et état de l'art sur les sécheurs solaires

Aujourd'hui, les systèmes de séchage solaire et les panneaux solaires se développent vite. Les chercheurs cherchent à améliorer leur efficacité grâce à des méthodes techniques et thermiques nouvelles.

IS Nasution, R. Agustina et M. A. Fauza ont travaillé sur la performance de séchage en lit profond du riz utilisant un séchoir hybride infrarouge-solaire. Le séchoir hybride infrarouge-solaire possède un potentiel pour le séchage des fruits, légumes et céréales telles que le riz. Cette étude vise à évaluer la performance du séchoir hybride sur du riz à différentes épaisseurs de couche profonde. Trois radiateurs infrarouges ont été utilisés avec des puissances de 25 W, 50 W et 100 W .Le séchoir hybride infrarouge-solaire a été équipé de capteurs placés dans un espace ouvert afin que la lumière du soleil atteigne la chambre de séchage. Les échantillons de riz ont été séchés à différentes épaisseurs de couche (2 cm, 4 cm, 6 cm) jusqu'à atteindre un taux d'humidité de 14 %. Les capteurs de la chambre de séchage, tels que la température, l'humidité et le contenu en eau, ont été enregistrés via un microcontrôleur et stockés dans Microsoft Excel® à l'aide de l'outil Parallaxe Data Acquisition. Un algorithme a été développé pour contrôler le radiateur en fonction des données des capteurs de température et d'humidité en ajustant l'allumage/extinction du relais. L'étude a confirmé que la puissance de chauffage infrarouge de 100 W est recommandée pour le séchage du riz si la température ambiante est défavorable (inférieure à 30 °C). En général, le séchoir hybride infrarouge-solaire avec des puissances de 25–100 W possède le potentiel de sécher le riz rapidement à des épaisseurs de 2 cm à 6 cm dans un intervalle de temps de 90 à 150 minutes [18].

Réda Khama a étudié la faisabilité du séchage solaire des fruits et légumes dans la région d'El Hodna, M'Sila, Algérie. Cette étude examine la possibilité d'utiliser le séchage solaire pour les fruits et légumes dans la région d'El Hodna en analysant les principaux facteurs climatiques tels que le rayonnement solaire, la température de l'air, l'humidité et la vitesse de l'air. Le séchage solaire est une méthode de conservation durable des aliments qui exploite l'énergie solaire pour éliminer l'humidité des produits agricoles. La région d'El Hodna, caractérisée par un ensoleillement abondant, des températures élevées et une vitesse de l'air favorable, constitue un cadre idéal pour cette technique. En effectuant une analyse complète des données climatiques, l'étude vise à déterminer l'adéquation de la région pour un séchage solaire efficace. Les données climatiques, y compris les niveaux de rayonnement solaire, la température de l'air, l'humidité et la vitesse de l'air, ont été collectées à partir de sources météorologiques. L'analyse a révélé que la région reçoit un niveau élevé de rayonnement solaire, en moyenne 6,5 kWh/m²/jour, et connaît des températures de l'air comprises entre 25 et 35 °C, favorables au séchage. De plus, l'humidité relative, en moyenne autour de 40 %, facilite une élimination efficace de l'humidité, tandis que la vitesse de l'air, généralement comprise entre 2 et 4 m/s, aide à accélérer le processus de séchage en augmentant l'évaporation de l'eau. Ces résultats indiquent que les conditions climatiques dans la région d'El Hodna sont très favorables au séchage solaire. L'étude conclut que le séchage solaire est une méthode pratique et viable pour conserver les fruits et légumes dans la région d'El Hodna, M'Sila. La mise en œuvre de cette technique peut réduire considérablement les pertes post-récolte, renforcer la sécurité alimentaire et promouvoir des pratiques agricoles durables. Les avantages potentiels s'étendent aux agriculteurs locaux, leur offrant une méthode de conservation économique et écologique tirant parti des avantages climatiques naturels de la région [19].

Hamed Jafarishad, Mucheng Li, Yao Shen, Pawan Singh Takhar et Yuxiang Liu ont travaillé sur le développement d'un capteur de déformation à fibre optique à l'échelle millimétrique, permettant de mesurer continuellement la déformation interne des aliments sous leur surface pendant le processus de séchage. Le capteur comporte une gaine tampon souple, offrant une large plage de déformation mesurable tout en minimisant son influence sur la déformation naturelle de l'aliment. Les performances du capteur ont été étudiées à la fois théoriquement et expérimentalement. Pour démontrer son application dans les produits alimentaires, les auteurs ont intégré le capteur à l'intérieur de tranches de banane fraîche durant un processus de séchage à l'air de 4 heures, au cours duquel leur teneur en humidité (base humide) a diminué d'environ 80 % à 40 %. Les mesures obtenues par la fibre optique ont couvert toute la déformation normale (~20 %) des tranches de banane et ont révélé les caractéristiques de durcissement de la couche externe, aussi bien selon leur distribution spatiale qu'en fonction du temps, grâce à la comparaison avec les déformations de surface mesurées par vision par ordinateur. Ce travail propose un capteur de déformation inédit, présentant un fort potentiel pour améliorer à la fois la compréhension fondamentale et le suivi des procédés de séchage des aliments [20].

Nikita Mishra, S.K. Jain, N. Agrawal, N.K. Jain, Nikita Wadhawan et N.L. Panwar ont étudié l'un des aspects essentiels de la gestion de la sécurité alimentaire : le séchage, qui contribue à préserver la qualité des aliments et à prolonger leur durée de conservation. Ils ont souligné que la température, l'humidité relative (HR) et la vitesse de l'air dans les séchoirs doivent être soigneusement surveillées et maintenues pour garantir la qualité et la sécurité des aliments pendant le processus de séchage. De plus, les composants des séchoirs à pompe à chaleur sont exposés à des risques dus au courant électrique, à la température élevée entourant le compresseur de l'unité de condensation et à la forte vitesse de l'air dans l'environnement de séchage. Ces éléments influencent la qualité des aliments séchés, et la capacité à communiquer des alertes en temps réel est essentielle pour prendre des précautions contre les dangers pouvant endommager les composants internes du séchoir. Le système de contrôle basé sur l'IoT en technologie alimentaire (IoT-BC), équipé de capteurs polyvalents, offre des options pour gérer la qualité post-récolte des feuilles pendant leur séchage. Cette étude a pour objectif de concevoir et d'évaluer un système IoT-BC afin de contrôler à distance, d'alerter sur les dangers imminents et de surveiller les paramètres microclimatiques, y compris la HR, la température et la vitesse de l'air. Les impacts du système de séchage basé sur l'IoT sur la qualité des légumes-feuilles séchés ont également été étudiés en utilisant un séchoir unique comme étude de cas. Les résultats ont montré que le système IoT-BC conçu maintenait avec précision l'environnement de séchage, fournissait des données fiables sur le microclimat interne du séchoir et émettait l'alerte appropriée en cas d'urgence, sur la base d'analyses de données en temps réel. Les caractéristiques de qualité les plus importantes pour les feuilles séchées n'étaient pas significativement différentes entre le séchoir IoT-BC et le séchoir conventionnel en fonction du temps de séchage. La capacité de réhydratation diminuait lorsque la température de l'air de séchage augmentait de 40 à 70 °C et était maximale (6,48) à 40 °C pour les feuilles de coriandre et maximale (5,59) à 40 °C pour les feuilles de menthe séchées dans le séchoir IoT. Les teneurs maximales en fibres brutes et en protéines pour les feuilles de menthe séchées

dans un séchoir IoT étaient respectivement de 4,97 mg/100 g et 10,62 mg/100 g à 40 °C. Pour les feuilles de coriandre, ces valeurs étaient respectivement de 3,76 mg/100 g et 12,23 mg/100 g. Ainsi, le séchoir basé sur l'IoT a permis de conserver les qualités supérieures des feuilles tout au long du processus de séchage [21].

Seyed-Hassan Miraei Ashtiani et Alex Martynenko ont étudié l'importance de la surveillance en temps réel des variables directement non mesurables, telles que la teneur en humidité du produit et les attributs de qualité, qui est cruciale pour optimiser le contrôle des procédés dans les séchoirs intelligents. Ils ont montré que les techniques avancées de détection douce (soft sensing), qui intègrent le matériel analytique avec des modèles mathématiques, ont permis le développement de systèmes de séchage intelligents. Cette revue évalue de manière exhaustive les applications des capteurs doux pour la surveillance en ligne dans le séchage des aliments, en mettant l'accent sur les caractéristiques de performance telles que la précision, le temps de réponse et la robustesse pour le contrôle en temps réel. Les principaux obstacles, notamment la contamination des données, le choix des modèles et l'adaptabilité, sont examinés, et des solutions émergentes telles que les algorithmes adaptatifs et les stratégies de modélisation hybrides sont discutées. La revue souligne comment les capteurs doux contribuent à améliorer l'efficacité du séchage, à réaliser des économies d'énergie et à préserver la qualité des produits. Les implications plus larges pour les industries connexes sont également prises en considération [22].

Brij Bhushan Sharmal, Pankaj Vaidya, Nitin Kumar, Ankita Tiwari, Shonak Bansal, Mohammad Rashed Iqbal Faruques et K. S. Al-mugren ont travaillé sur l'amélioration de la durabilité post-récolte des cultures tempérées à travers un séchoir solaire indirect intelligent intégré à l'IoT. Les pertes post-récoltent des fruits et légumes, principalement dues à leur teneur élevée en eau, constituent un défi majeur pour l'agriculture. Les méthodes de séchage traditionnelles, telles que l'exposition directe au soleil, entraînent souvent contamination, dégradation de la qualité et inefficacité du séchage. Cette étude présente la conception et le développement d'un séchoir solaire indirect intelligent intégré à l'IoT, qui automatise le processus de séchage et introduit un système de contrôle spécifique à chaque culture, permettant aux utilisateurs de saisir des réglages de température précis selon le type de produit. Cette fonctionnalité garantit des conditions de séchage optimales adaptées à chaque produit, améliorant la préservation nutritionnelle et réduisant les risques de sur-séchage. Le système intègre une surveillance en temps réel via le Cloud grâce à l'IoT, permettant la supervision à distance et l'analyse des données pour le contrôle de la température et du flux d'air. Les résultats expérimentaux démontrent l'efficacité du système, atteignant un flux d'air moyen de 3,0 m/s, une température moyenne du collecteur solaire de 57 °C, et une température stable de 45 °C dans la chambre de séchage. Comparé aux séchoirs traditionnels, ce dispositif réduit considérablement le temps de séchage, minimise les risques de contamination, et offre une plus grande précision et flexibilité. Ces améliorations contribuent à une meilleure évolutivité, durabilité et facilité d'utilisation dans la gestion post-récolte, notamment pour les petits et moyens exploitants agricoles [23].

Khargotra, Kumar, Kovács et Singh ont travaillé sur une étude d'analyse techno-économique du collecteur solaire thermique pour un environnement bâti durable, l'Inde disposant d'une abondance de ressources solaires et environ 90% des citadins dans différentes régions de l'Inde utilisant l'électricité pour chauffer l'eau. L'utilisation de l'électricité pour le chauffage de l'eau domestique ne contribue pas seulement à un impact environnemental négatif via l'émission d'une quantité importante de dioxyde de carbone, mais elle impose également un fardeau financier aux ménages. L'examen de l'irradiance solaire, de la faisabilité économique et des besoins en eau chaude était essentiel pour évaluer la capacité du collecteur solaire thermique (STC) à répondre aux besoins en eau chaude. Pour améliorer l'efficacité, le STC est équipé d'un obstacle à l'intérieur du tube. Le collecteur a été examiné au cours de trois saisons différentes afin d'observer les variations de température et l'utilisation appropriée de l'appareil pendant les heures d'inactivité, avec des températures moyennes recommandées pour l'été, la saison des pluies et l'hiver de 68, 57 et 47 °C respectivement. En outre, une analyse économique détaillée et la période de retour sur investissement ont également été réalisées pour le collecteur solaire thermique [24].

F. CHABANE, et E. SEKSEFF ont étudié expérimentalement un capteur solaire à air à double vitrage dans le site de Biskra, Algérie. Ils ont prouvé que le double vitrage a amélioré nettement les performances de tel capteur solaire. Donc ils ont pu minimiser les pertes de chaleur vers l'avant pour améliorer les performances thermiques de ce type de capteurs solaires. L'air utilisé comme fluide caloporteur repose sur plusieurs principes, notamment la conservation de l'énergie thermique en minimisant les pertes de chaleur vers l'avant. Ils ont fait une étude descriptive d'un banc d'essai, en effet, ils ont fait des mesures sur un capteur solaire à double vitrage. Un capteur solaire à double vitrage est construit et installé sur le site de Biskra, Algérie là où ils ont fait leurs mesures. Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que l'ajout d'une deuxième couche de verre a pu réduire efficacement les pertes de chaleur vers l'avant de ce type de capteur solaire à air. Ils ont fixé comme objectif principal d'améliorer les performances d'un capteur solaire à air à double en menant une étude expérimentale au site dudit de Biskra. À cet effet, les valeurs mesurées avec simple vitrage et double vitrage sont comparées en agissant sur le débit du fluide caloporteur [25].

Reza Sadeghi, Mattia Parenti, Samuele Memme, Marco Fossa et Stefano Morchio ont travaillé sur une revue et analyse comparative des systèmes de suivi solaire. Cette étude fournit un aperçu complet et multidisciplinaire des avancées récentes dans les systèmes de suivi solaire (STSs) visant à améliorer l'efficacité et l'adaptabilité des technologies photovoltaïques (PV). L'étude classe systématiquement les suiveurs solaires en fonction des axes de suivi (fixe, un seul axe et double axe), des mécanismes d'entraînement (actif, passif, semi-passif, manuel et chronologique) et des stratégies de contrôle (boucle ouverte, boucle fermée, hybride et basé sur l'IA). Les systèmes PV à inclinaison fixe servent de référence, avec des suiveurs à un seul axe obtenant un rendement énergétique supérieur de 20 à 35%, et des suiveurs à double axe offrant des gains énergétiques de 30 à 45% selon les conditions géographiques et climatiques. En particulier,

Les systèmes à double axe surpassent les autres dans les régions de haute latitude et équatoriales grâce à leur capacité à suivre à la fois l'azimut et l'angle d'élévation tout au long de l'année. Les technologies de capteurs telles que LDR, capteurs UV et capteurs à fibre optique sont comparées en termes de précision et d'adaptabilité environnementale, tandis que les plateformes microcontrôleur – y compris Arduino, ATmega et les contrôleurs basés sur PLC – sont évaluées pour leur évolutivité et leur champ d'application. Les systèmes de suivi intelligents, en particulier ceux exploitant l'apprentissage automatique et l'analyse prédictive, montrent des gains énergétiques supplémentaires jusqu'à 7,83% dans des conditions nuageuses par rapport aux algorithmes conventionnels. La revue met également l'accent sur les stratégies de suivi adaptatif pour le backtracking, les conditions de haute latitude et le temps nuageux, ainsi que sur les applications émergentes en agri voltaïque, où le suivi solaire améliore non seulement la capture d'énergie mais aussi le contrôle de l'ombre, la productivité des cultures et la distribution de l'eau de pluie. Les résultats soulignent l'importance de choisir des stratégies de suivi appropriées en fonction des facteurs spécifiques au site, des contraintes économiques et des conditions climatiques, tout en mettant en évidence le rôle central des technologies de suivi solaire pour atteindre une pénétration solaire plus importante et soutenir les objectifs mondiaux de durabilité, en particulier l'ODD 7 (Énergie abordable et propre) et l'ODD 13 (Action pour le climat) [26].

Mohamed Kchaou a étudié la spécificité des systèmes de chauffage solaire de l'eau, en mettant en évidence leurs avantages financiers et en discutant leurs bénéfices économiques. Plusieurs études ont montré que la performance efficace des chauffe-eau solaires et les meilleures économies de coûts étaient obtenues durant les saisons chaudes. Les nouvelles avancées dans les chauffe-eau solaires ont été discutées en détail. Selon de nombreuses recherches, la performance de la plus haute qualité des chauffe-eau solaires et les meilleures économies de coûts étaient atteintes lorsque le système était intégré à des composants innovants tels que les matériaux à changement de phase (MCP), les caloducs et les turbulateurs. Les technologies émergentes utilisant les MCP ont montré d'excellents résultats, augmentant l'efficacité thermique solaire. Cette technologie présente un grand potentiel non seulement pour les applications domestiques mais également à l'échelle industrielle [27].

Suman Debnath, Papiya Bhowmik, Gaurav Arora et Manoj Kumar Singh ont étudié les récentes modifications des collecteurs solaires à air (SACs), qui ont significativement amélioré leur performance et élargi leurs applications dans la capture et la conversion de l'énergie solaire. Cette revue examine les applications des SACs dans les procédés thermiques industriels, le chauffage des espaces et le séchage, en mettant l'accent sur les avancées récentes et les techniques d'amélioration des performances. Les aspects clés incluent la conception de la plaque absorbeuse, les conditions de fonctionnement et les paramètres environnementaux. Des paramètres tels que l'angle d'inclinaison du collecteur, le type de vitrage et le débit massique d'air influencent de manière critique la performance thermique et exergétique. Les plaques absorbeuses ondulées surpassent les plaques planes en raison de l'augmentation de la turbulence, de la surface d'échange thermique et de la formation de vortex. Le double vitrage réduit les pertes radiatives et convectives par rapport au vitrage simple. Bien que des débits massiques d'air plus élevés améliorent

L'efficacité énergétique, ils augmentent également les pertes de charge. Les variations saisonnières montrent une plus grande efficacité en été, attribuée à un ensoleillement plus élevé. La revue couvre également les éléments de construction, tels que les conduits, le vitrage, les plaques absorbeuses et l'isolation, et met en évidence des méthodes d'amélioration innovantes comme la rugosité artificielle, les surfaces étendues, le flux d'air multi-passe et des géométries avancées telles que les V-grooves et les rugosités 3D. Les analyses thermo-hydrauliques sont utilisées pour évaluer l'énergie, l'exergie et l'efficacité effective, aidant à identifier les conditions optimales de fonctionnement. Les applications dans le chauffage des espaces, le séchage agricole, l'intégration dans les bâtiments et la climatisation assistée par solaire sont discutées, ainsi que les techniques de modélisation numérique et théorique, y compris le potentiel de la dynamique des fluides numérique (CFD) pour soutenir l'optimisation future des systèmes. Bien que la performance énergétique des SACs soit largement étudiée, la revue identifie l'analyse exergétique et les effets du vieillissement des matériaux (notamment du vitrage et des revêtements) comme des domaines nécessitant une étude approfondie. Enfin, le travail souligne les impacts économiques et environnementaux plus larges du déploiement des SACs. La revue conclut en proposant plusieurs directions de recherche futures, telles que la modélisation intégrée CFD, l'optimisation basée sur les systèmes experts, le développement de nano-revêtements et l'hybridation avec les matériaux à changement de phase (PCM), visant à accélérer l'adoption des SACs dans les systèmes énergétiques durables [28].

Eric King'ori et Isaac N. Simate ont étudié la conception et le développement d'un chauffe-air solaire à collecteur parabolique (PTSAH) pour un séchoir de serre (GD), afin d'améliorer la performance du séchoir. Les matériaux utilisés pour la fabrication du PTSAH comprenaient des tôles galvanisées recouvertes de feuille d'aluminium, un tube absorbeur en tuyau GI peint en noir mat pour augmenter l'absorption de chaleur à la ligne focale, des tubes carrés en acier doux, du contreplaqué pour volets, et un ventilateur axial pour pousser l'air à travers le tube absorbeur. Les principaux paramètres géométriques utilisés pour la conception du PTSAH étaient un angle de bordure de 98 degrés, une distance focale de 0,2608 m, une hauteur de 0,3451 m, une longueur de 2 m et une largeur d'ouverture de 1,2 m. La surface totale de l'ouverture du PTSAH était de 2,4 m², tandis que la surface du tube absorbeur était de 0,1587 m². Le PTSAH a été testé expérimentalement afin d'établir sa performance thermique. Il a été constaté que l'air ambiant enregistrait une température moyenne de 31,1 °C et que le chauffe-air pouvait augmenter la température de l'air de 45,6 °C au-dessus de l'ambiant, avec un rendement thermique de 5,3 %. Il peut donc être conclu que le PTSAH peut améliorer significativement la performance d'un GD en fournissant de l'air à une température plus élevée que l'air ambiant [29].

À travers cette étude bibliographique, nous avons constaté que plusieurs recherches ont porté sur l'amélioration des performances des séchoirs solaires grâce à l'intégration de capteurs intelligents, des technologies IoT et des systèmes de contrôle.

Cependant, peu de travaux ont proposé un séchoir solaire intelligent destiné au séchage des fruits et légumes permettant à la fois la surveillance en temps réel de la température et de l'humidité ainsi que le suivi à distance à l'aide d'une application mobile. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire et le gisement solaire. Nous avons également étudié les différentes composantes du rayonnement solaire ainsi que les paramètres qui influencent son exploitation.

Cette partie nous a permis d'acquérir les connaissances nécessaires pour mieux comprendre l'utilisation de l'énergie solaire dans les applications thermiques. Les notions présentées serviront de base pour la suite de ce travail. Dans le chapitre suivant, nous aborderons les capteurs solaires thermiques et les techniques de séchage solaire.

Chapitre II

Théorie des capteurs solaires

Chapitre II Théorie des capteurs solaires

II.1 Introduction

L'énergie solaire constitue une source d'énergie importante et renouvelable. L'être humain est capable de la capter et de l'utiliser de manière judicieuse dans diverses applications tout en réduisant la production de polluants nocifs. Il existe plusieurs moyens de convertir l'énergie solaire sous une forme plus utilisable, notamment en chaleur ou en électricité. Les moyens d'exploitation de l'énergie solaire sont divisés en systèmes passifs et systèmes actifs. Les systèmes passifs utilisent directement le rayonnement solaire à travers les caractéristiques et les conceptions architecturales des bâtiments. Ils permettent d'assurer l'éclairage naturel et le chauffage des espaces avec une bonne efficacité énergétique. Les systèmes actifs utilisent des technologies spécifiques pour convertir l'énergie solaire en une forme d'énergie exploitable selon les besoins. Pour cela, un capteur solaire est utilisé. Ce dispositif est conçu pour capter l'énergie solaire et la transférer à un fluide caloporteur sous forme de chaleur. Cette énergie thermique peut être utilisée pour la production d'eau chaude ou pour le chauffage des espaces [30].

En effet, les sécheurs solaires sont une application majeure de l'énergie solaire puisqu'ils permettent de réduire l'humidité des produits en utilisant les rayons solaires ou les capteurs thermiques. Par ailleurs, cette méthode est respectueuse de l'environnement et permet une meilleure conservation des produits grâce à une méthode de séchage douce. Ainsi, le présent chapitre est consacré à une introduction à certains des principaux concepts expliquant le fonctionnement des capteurs solaires plans et leur rôle dans les systèmes de séchage solaire.

II.2 Capteurs solaires thermiques

II.2.1 Définition d'un capteur solaire thermique

Le capteur solaire constitue l'élément central d'un système solaire thermique, jouant le rôle de source de chaleur. C'est au sein de ce dispositif que l'énergie du soleil est absorbée par le fluide caloporteur. La chaleur ainsi générée circule ensuite dans le circuit du capteur et est, dans la majorité des cas, stockée dans un réservoir intermédiaire. À partir de ce stockage, la chaleur peut être distribuée aux différents utilisateurs reliés au système. Certains matériaux utilisés dans les capteurs permettent la transmission d'un large spectre de longueurs d'onde, tandis que le verre laisse passer principalement la lumière visible et le proche infrarouge. En plaçant un corps noir à l'intérieur d'une enceinte en verre, la lumière qui traverse cette enveloppe chauffe le corps noir, portant sa température entre 30°C et 100°C. Ce corps noir, désormais chaud, émet des rayons infrarouges que le verre ne laisse pas passer. Ces rayons infrarouges restent piégés à l'intérieur de l'enceinte et sont renvoyés vers le corps noir, contribuant ainsi à augmenter encore sa température [31].

Ce phénomène est désigné sous le terme d'effet de serre.

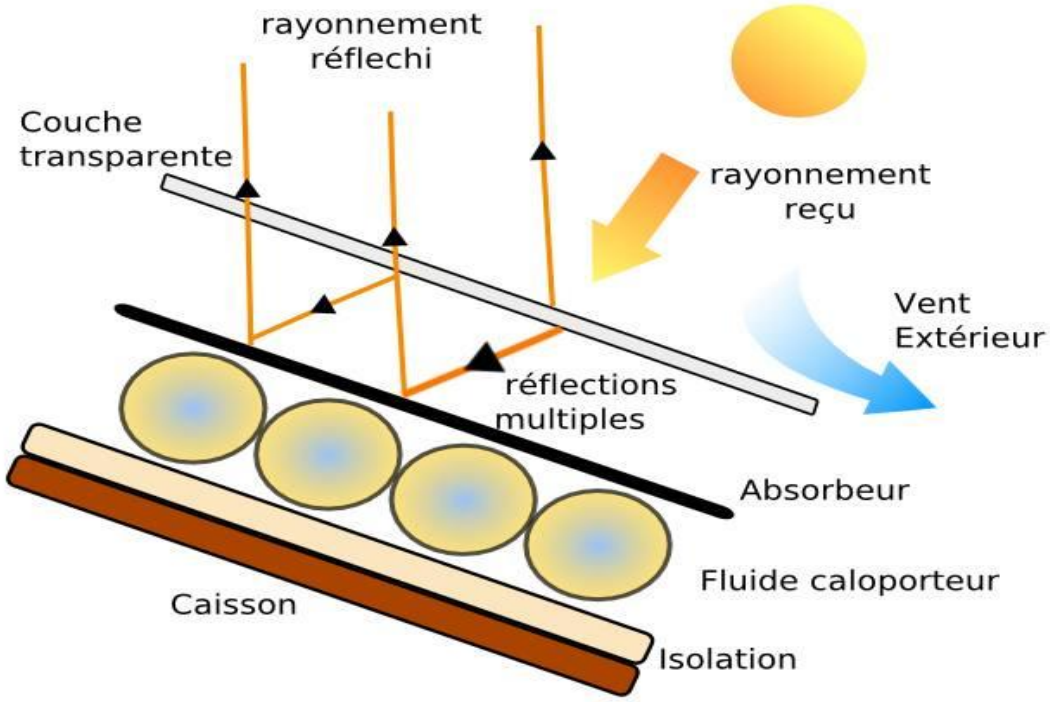


Figure II.1 Réflexion des faisceaux lumineux sur un vitrage et déperditions de chaleur d'un capteur.

II.2.2 Principe de fonctionnement d'un capteur thermique

Le capteur solaire sert à récupérer l'énergie du soleil et à la transformer en chaleur. Cette chaleur est ensuite transportée par un fluide qu'on appelle fluide caloporteur. Son fonctionnement repose sur l'effet de serre : les rayons du soleil, composés de lumière visible et d'infrarouge proche (entre 0,78 µm et 3 µm), passent à travers la vitre, restent à l'intérieur et sont absorbés par une surface qui retient la chaleur [32].

Le rayonnement thermique émis par la surface absorbante se situe dans l'infrarouge lointain, au-delà du spectre visible, entre 4 µm et 30 µm. La paroi en verre bloque une grande partie de ce rayonnement, se réchauffe à son contact et redistribue la chaleur : une fraction retourne vers la surface absorbante, tandis que l'autre est dirigée vers l'extérieur. Le fluide circulant sous cette paroi capte une partie de cette énergie par convection, ce qui entraîne une élévation de sa température lorsqu'il traverse le capteur [33].

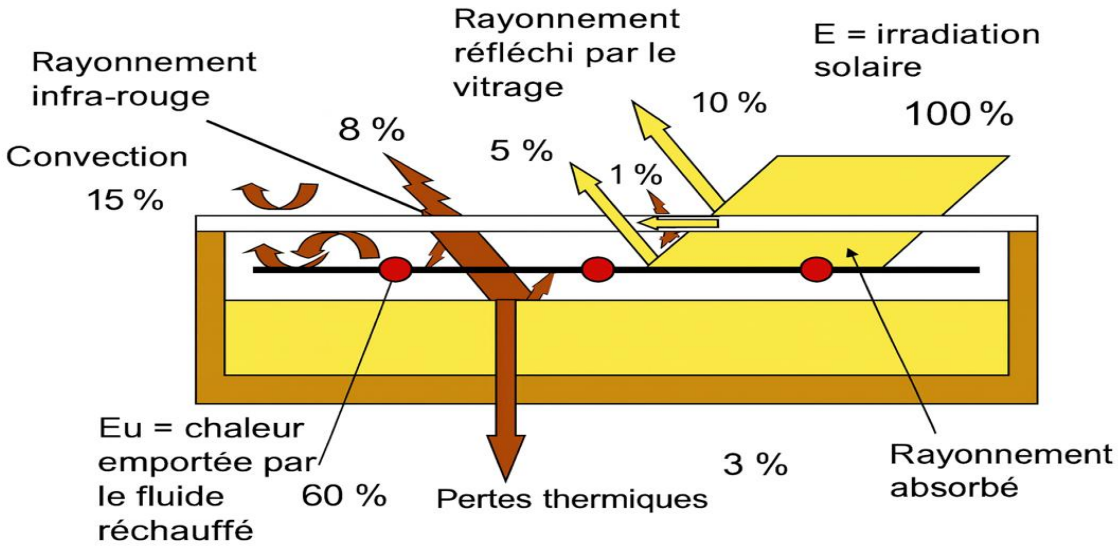


Figure II.2 Schématisation du principe de captation du rayonnement solaire.

II.2.3 Autres valeurs caractéristiques du capteur

a. Capacité thermique des capteurs

La capacité thermique d'un capteur solaire est déterminée par des tests réalisés selon la norme EN 12975-4. Elle traduit l'inertie thermique de l'appareil, c'est-à-dire sa faculté à réagir aux changements de température, qu'il s'agisse de chauffage ou de refroidissement. Une faible capacité thermique constitue un avantage pour l'utilisation du capteur dans des environnements climatiques instables, comme ceux que l'on rencontre fréquemment en Europe centrale.

b. Perte de pression dans le capteur

La chute de pression dans le capteur, selon les différents débits, est évaluée par des essais réalisés conformément à la norme EN 12975. Ces tests se font le plus souvent avec de l'eau, ce qui oblige à adapter les calculs afin de tenir compte du mélange eau/glycol utilisé couramment dans les installations.

c. Température de stagnation

Lorsque le capteur reçoit un rayonnement solaire constant de 1000 W/m², avec une température ambiante de 30 °C et sans circulation de fluide, l'énergie absorbée se stabilise par rapport aux pertes thermiques. La température maximale atteinte dans ces conditions est désignée sous le nom de température de stagnation.

d. Surface du capteur

Pour estimer l'énergie produite par un capteur, il faut avant tout connaître sa surface avec précision. En effet, la surface joue un rôle déterminant dans l'évaluation de ses performances [34].

II.2.4 Types de capteurs solaires thermiques

II.2.4.1 Capteurs à concentration

Les capteurs solaires concentrateurs fonctionnent en utilisant des miroirs réfléchissants, qu'ils soient paraboliques ou cylindro-paraboliques, pour diriger la lumière du soleil vers un point précis ou le long d'une ligne focale. À ces endroits, des absorbeurs récupèrent la chaleur concentrée. Cette technique augmente fortement l'intensité du rayonnement, et les récepteurs peuvent atteindre des températures très élevées, parfois plusieurs centaines ou même des milliers de degrés Celsius [35].

a. Capteur cylindre-parabolique

Le capteur cylindro-parabolique est équipé d'un système motorisé qui lui permet de suivre automatiquement le soleil. La lumière solaire est focalisée sur l'absorbeur, où un fluide caloporteur circule pour transférer la chaleur vers un réservoir de stockage grâce à une petite pompe. Quand l'eau chauffe et se transforme en vapeur, celle-ci actionne une turbine qui entraîne un générateur produisant de l'électricité. Après cette étape, la vapeur se condense et retourne au réservoir pour que le cycle reprenne [35].

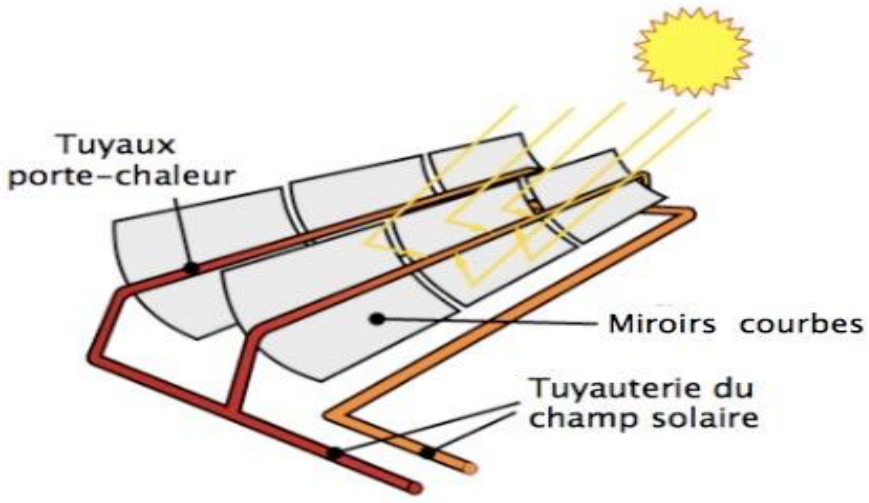


Figure II.3 Schéma de principe d'un concentrateur cylindre-parabolique.

b. Miroirs de Fresnel

La fabrication du verre pour obtenir la courbure parabolique nécessaire représente un coût important dans les collecteurs cylindro-paraboliques. Pour diminuer ces dépenses, plusieurs équipes de recherche étudient des prototypes de collecteurs de Fresnel à concentration linéaire. L'idée consiste à reproduire approximativement la forme parabolique en utilisant plusieurs miroirs plats, comme illustré dans la (Figure II.4). Cette méthode simplifie la fabrication et réduit les coûts liés aux formes complexes des miroirs paraboliques classiques [35].

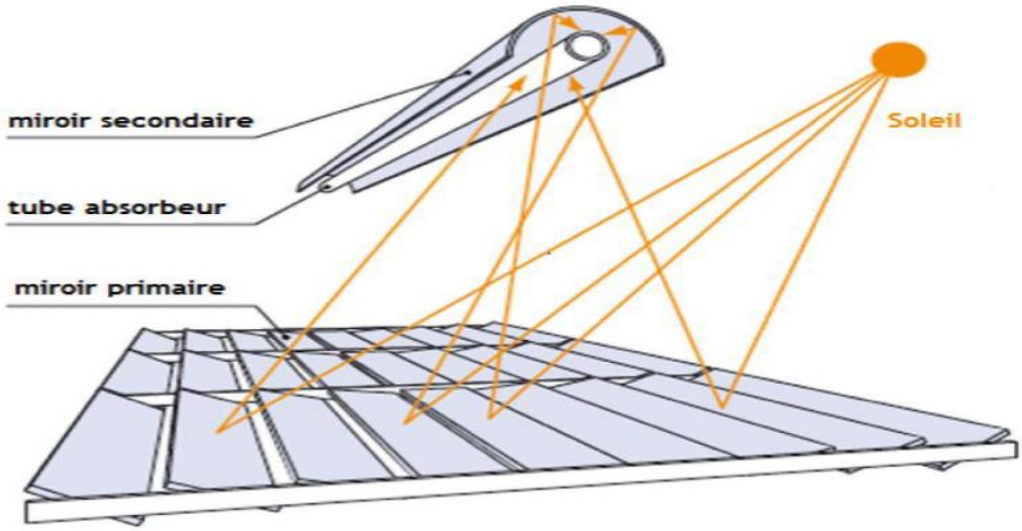


Figure II.4 Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel.

c. Miroirs paraboliques :

Le schéma de fonctionnement de ce capteur est présenté dans la Figure (II.5). Le miroir parabolique dirige les rayons du soleil vers un point unique, concentrant ainsi l'énergie solaire sur le récepteur et provoquant une hausse significative de la température.

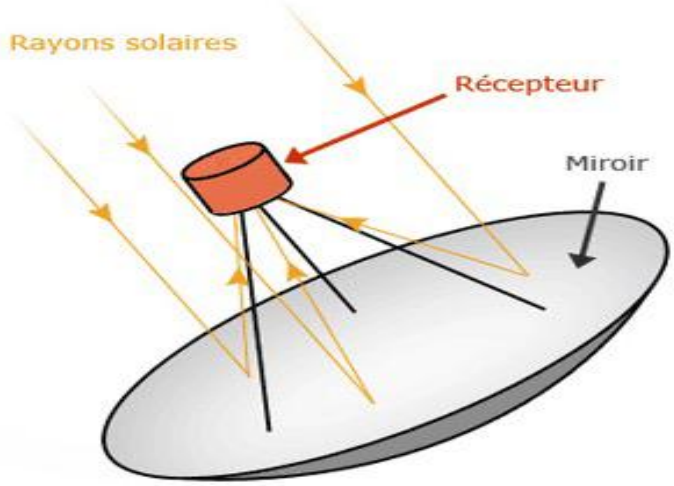


Figure II.5 Schéma de principe d'un concentrateur parabolique.

Le récepteur est constitué d'un moteur Stirling qui exploite l'augmentation de température et de pression d'un gaz contenu dans un compartiment fermé. Ce moteur transforme l'énergie thermique du soleil en énergie mécanique, puis en électricité. Tout au long de la journée, la base du miroir parabolique s'oriente automatiquement pour suivre le mouvement du soleil, afin d'optimiser la capture de l'énergie solaire disponible [35].

d. Héliostats

L'héliostat est un dispositif permettant de suivre le déplacement du soleil et de diriger ses rayons vers une petite surface fixe grâce à l'utilisation de miroirs.

Dans les centrales solaires, un grand nombre d'héliostats sont disposés pour concentrer la lumière solaire sur un point unique situé au sommet d'une tour. À ce niveau, le rayonnement est absorbé par un absorbeur qui transforme cette énergie en chaleur intense, pouvant atteindre des températures proches de 1000°C (voir Figure II.6).

L'usage de l'héliostat optimise la concentration du rayonnement solaire sur l'absorbeur, ce qui permet de générer une chaleur très élevée utilisée dans les procédés thermiques de la centrale [35].

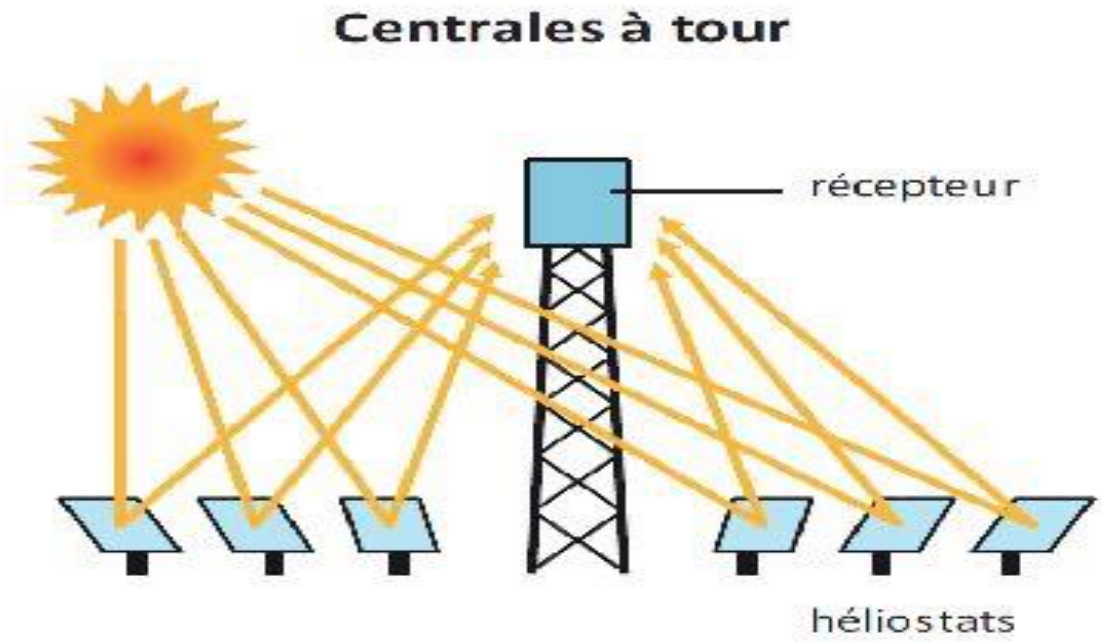


Figure II.6 Schéma de principe d'une centrale à tour.

Un fluide caloporteur, souvent constitué de sels fondus, circule au sommet de la tour. Lorsque ce fluide est chauffé, il transmet son énergie à un circuit d'eau, produisant de la vapeur. Cette vapeur actionne une turbine qui génère de l'électricité. Ainsi, l'énergie solaire est convertie en chaleur, puis en énergie mécanique et enfin en électricité grâce au fluide caloporteur [35].

II.2.4.2 Tube sous vide

Les capteurs solaires thermiques reposent sur les tubes à vide. Cette technique, initialement mise au point par l'Université de Sydney en Australie dès 1975, est considérée comme innovante. Elle a été par la suite industrialisée au Japon et son développement s'est largement étendu grâce à la production externalisée vers la Chine.

Chaque capteur solaire sous vide comprend plusieurs tubes en verre transparent, dont le diamètre varie entre 5 et 15 cm. À l'intérieur de chaque tube, un absorbeur capte le rayonnement solaire et un échangeur thermique facilite le transfert de chaleur. Le vide présent à l'intérieur réduit considérablement les pertes par convection, tandis que l'absorbeur reçoit un traitement sélectif afin de piéger efficacement le rayonnement. Cette configuration permet de fabriquer des capteurs performants sans ajouter d'isolation supplémentaire ou de boîtier de protection [36].

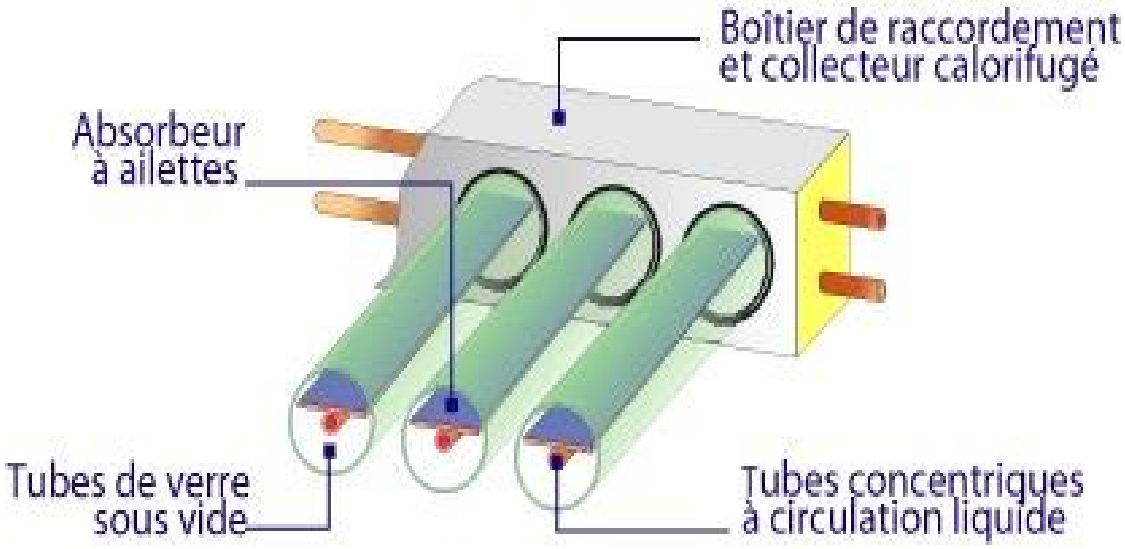


Figure II.7 Schéma du capteur solaire sous vide.

Pour maintenir leur performance, il est indispensable que le vide soit inférieur à 10^{-3} Pa. Tout tube présentant une fuite devient inefficace et doit être remplacé. Pour détecter les pertes de vide, les tubes possèdent un indicateur contenant du baryum (getter) : une fine couche métallique déposée lors de la fabrication. Si cette couche est exposée à l'air, elle blanchit, signalant ainsi qu'il y a eu une perte de vide [36].

II.2.4.3.Capteur plan

Les capteurs solaires plans sont des dispositifs essentiels pour convertir l'énergie solaire en chaleur à basse température. En l'absence de système de concentration, l'énergie solaire qui atteint une surface au niveau de la mer reste généralement inférieure à 1 kW/m², limitant ainsi la température maximale à environ 100°C.

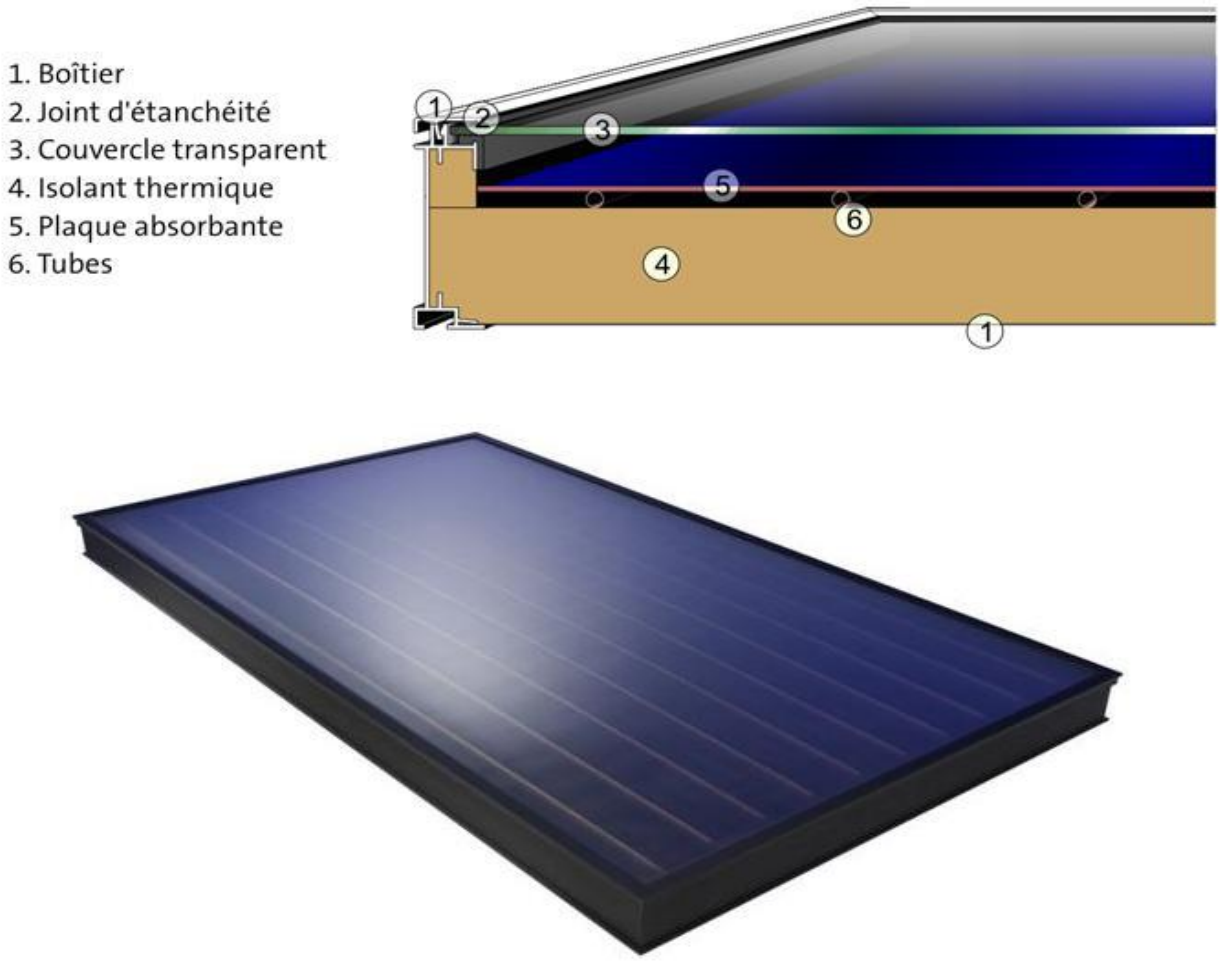


Figure II.8 Capteur plan.

Ces capteurs présentent l'avantage de ne pas nécessiter de suivi du soleil et de pouvoir exploiter à la fois le rayonnement direct et diffus. Ils sont principalement destinés à la production d'eau chaude sanitaire, ainsi qu'au chauffage des logements et des piscines (Figure II.8). Leur conception permet de tirer parti de manière homogène de l'énergie solaire disponible, offrant une solution efficace et fiable pour toutes les applications où la température ne doit pas dépasser 100°C [37].

II.2.5 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire utilise simultanément les trois modes de transfert thermique (conduction, convection et rayonnement) pour assurer le transport efficace de la chaleur à l'intérieur du système (Figure II.9).

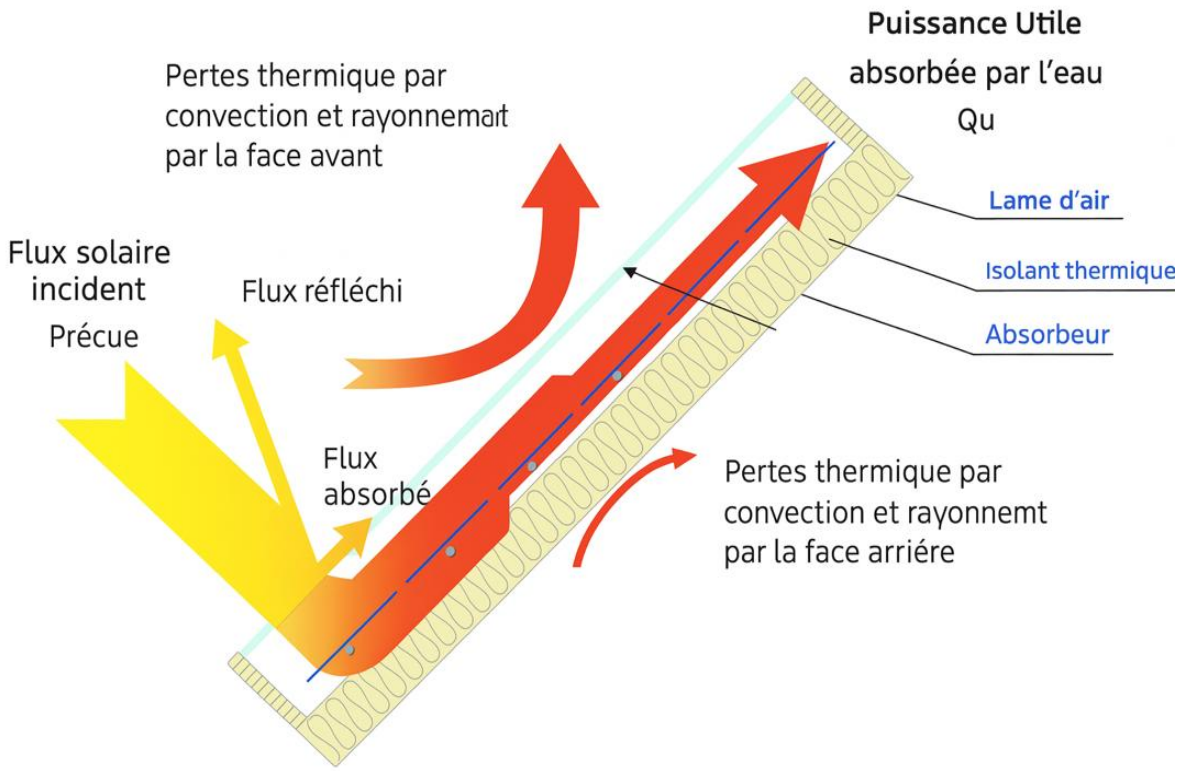


Figure II.9 Les différents échanges thermiques dans un capteur.

II.2.5.1 La conduction

La conduction est un mode de transfert thermique dans lequel l'énergie se diffuse à travers un matériau sans mouvement du milieu. Ce phénomène de diffusion de chaleur est régi par la loi de Fourier, exprimée par la relation suivante :

$$q = -k \times A \times \frac{dT}{dx} \qquad \text{(II-1)}$$

q : flux de chaleur.

k : coefficient de conductivité thermique.

A : surface d'échange.

II.2.5.2 La convection

La convection correspond au transfert de chaleur provoqué par le déplacement du fluide à une échelle visible. On peut distinguer deux formes principales :

a. La convection forcée

Dans ce cas, le fluide est mis en mouvement par une action extérieure, comme le vent, une pompe ou un ventilateur.

b. La convection naturelle

Ici, le fluide se déplace de lui-même à cause des différences de densité liées aux variations de température à l'intérieur du fluide. Ce phénomène est connu sous le nom de thermocirculation. Le transfert de chaleur par convection suit la loi de Newton :

$$\boldsymbol{q = h \times S \times (T_P - T_F)} \quad \text{(II-2)}$$

q : le flux échangé par convection.

h : coefficient de convection.

S: surface de la paroi solide en contact avec le fluide.

T_p: température de la paroi solide.

T_f: température du fluide.

II.2.5.3 Le rayonnement

Le transfert thermique par rayonnement se produit lorsque de l'énergie est transmise sous forme d'ondes électromagnétiques d'une surface vers une autre. Ce type d'échange peut se faire même en absence de contact direct, que ce soit dans le vide ou à travers un milieu qui laisse passer ces ondes [38].

La relation fondamentale qui décrit ce phénomène est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$q = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad \text{(II-3)}$$

q : densité de flux de chaleur émis par le corps.

ε : Émissivité thermique du matériau.

σ: Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5{,}67\times10^{-8}$ W/m^2.K^4.

T: température absolue du corps

II.3 Séchage

II.3.1 Définition du séchage

Le séchage est en effet l'un des plus anciens procédés qui aient été utilisés à des fins de conservation d'aliments ou produits agricoles, de pêche et d'élevage. Il s'agit de l'ensemble des opérations permettant de transformer les périssables en produits stables par la réduction de la teneur en eau du produit [39].

Dans les industries alimentaires, le séchage est une étape très importante. Il se fait souvent à la fin de la fabrication d'un produit et aide à garder sa qualité jusqu'au bout [40].

Le séchage peut servir soit à conserver les aliments, soit à faire partie du processus de transformation de certains produits. Il est utilisé dans les zones rurales pour sécher les produits agricoles, et dans l'industrie pour sécher les produits alimentaires, le textile, et d'autres matériaux [41].

Les scientifiques ont observé que lorsqu'on diminue l'eau contenue dans les aliments à environ 10 à 20 %, la majorité des micro-organismes comme les bactéries, les champignons et les enzymes cessent de se développer. Les aliments gardent leur goût naturel et conservent la plupart de leurs nutriments, parfois même de façon plus concentrée. Les produits ainsi séchés peuvent être stockés pendant plusieurs mois sans problème. De plus, leur poids réduit considérablement leur manipulation : un aliment sec pèse environ un sixième de son poids frais, ce qui facilite à la fois le transport et le stockage sans avoir besoin de matériel particulier [42].



Figure II.10 Les fruits séchés

Le séchage, l'une des techniques de conservation alimentaire les plus anciennes, peut être définie comme un transfert simultané de masse et de chaleur où l'activité de l'eau du produit est réduite. La réduction de l'eau entraîne une diminution de la valeur nutritionnelle des denrées alimentaires. Cette approche présente de multiples bénéfices : préserver les denrées alimentaires en neutralisant les enzymes, éradiquer les micro-organismes, atténuer la nature saisonnière de certaines activités dans les secteurs agricoles ou industriels, réduire le volume et la réduction du volume des aliments,

minimisation de leur espace occupé, simplification de leur déplacement et finalement fournir une présentation ou une caractéristique spécifique du produit (flocons de purée de pomme de terre, café déshydraté, etc.).

Deux impératifs doivent être respectés lors de l'optimisation du processus de séchage. Éléments clés : la consommation d'énergie minimale requise et le maintien de la qualité. Caractéristiques biologiques du produit déshydraté (aspect, saveur, senteur, parfum et valeurs nutritives).

II.3.2 Historique

Depuis toujours, l'homme a cherché à conserver sa nourriture, et le séchage est l'une des méthodes les plus anciennes. Les peuples anciens étendaient au soleil les herbes, les racines, les fruits et même la viande pour les faire sécher. Ils avaient compris que cette pratique leur permettait de disposer de réserves alimentaires pendant les hivers rigoureux, lorsque la nourriture se faisait rare ou était inexistante.

Ces aliments, une fois séchés, étaient faciles à porter et riches en nutriments, ce qui aidait les anciens à les emporter sans difficulté lors de leurs voyages ou de leurs chasses. Cette technique était connue dans de nombreuses régions du monde : les Phéniciens et d'autres pêcheurs méditerranéens avaient l'habitude de sécher leurs prises à l'air libre, tandis que les Chinois faisaient sécher leurs feuilles de thé au soleil.

Plusieurs autres cultures, d'autre part, ont mangé une variété d'aliments déshydratés. Par exemple, lorsque les scientifiques ont récemment fouillé des tombes égyptiennes antiques, ils ont découvert une variété d'aliments déshydratés, y compris des grains de blé. Ces aliments étaient destinés à soutenir l'esprit du défunt lors de son voyage dans l'au-delà.

Au cours des explorations des XVe et XVIe siècles, la majorité des marins ont consommé une variété d'aliments séchés pour rester en bonne santé pendant leurs voyages en mer [43].

II.3.3 L'Objectif de séchage

Le séchage a pour but principal de retirer l'eau des aliments ou autres produits qui se gâtent facilement, afin de les rendre plus stables. On enlève l'humidité contenue dans le produit par évaporation, jusqu'à ce que l'activité de l'eau (Aw) devienne inférieure à 0,5. Cela permet de conserver ces produits à température ambiante pendant une longue période sans qu'ils ne se détériorent [44].

II.3.4 Types de séchage

On utilise différentes méthodes pour sécher les aliments. Parmi les méthodes classiques, on trouve le séchage au soleil, le séchage en four et la lyophilisation. Il existe aussi des techniques modernes comme le séchage par micro-ondes ou par osmose. Chaque méthode fonctionne à sa

manière et possède ses points positifs et ses points faibles. Le choix dépend de l'aliment à sécher et de la manière dont on souhaite qu'il se conserve et garde sa qualité.

II.3.4.1 Séchage conventionnel

II.3.4.1.1 Séchage à l'étuve

Dans cette méthode, on fait passer de l'air chaud autour du matériau humide pour lui transmettre de la chaleur et permettre à l'eau qu'il contient de s'évaporer. La convection est ce qui fait le travail principal. Il est important de régler la température du four, de décider combien de temps l'échantillon restera à l'intérieur, et de choisir la taille de l'échantillon. Ces deux paramètres, la taille et le temps, doivent être adaptés au rapport entre la surface et le volume de ce que l'on veut sécher [45].



Figure II.11 Exemple d'une étuve universelle XU

II.3.4.1.2 La lyophilisation

La lyophilisation est une méthode pour garder les aliments en enlevant tout l'eau qu'ils contiennent. On fait cela en transformant directement la glace en vapeur, sans passer par l'eau liquide. Cette méthode se fait en trois grandes étapes :

- **Congélation :** le produit est congelé pour préparer l'eau à être enlevée.
- **Sublimation ou déshydratation primaire :** l'eau congelée s'évapore lentement à basse température et sous vide, ce qui garde le produit intact.
- **Désorption ou déshydratation secondaire :** on chauffe légèrement le produit, toujours sous vide, pour enlever le reste de l'eau. Cette étape finale rend le produit suffisamment sec pour pouvoir le garder longtemps sans problème [46].



Figure II.12 Lyophilisateur Pilote LPCCPLS15 et Lyophilisateur de Production

II.3.4.1.3 Séchage solaire

Dans les pays en développement, le séchage au soleil est une méthode très utilisée, efficace et peu coûteuse pour sécher et conserver les produits agricoles, alimentaires et d'autres types de produits. Utiliser l'énergie solaire pour sécher les produits agricoles est une solution économique. En revanche, le séchage industriel consomme beaucoup de combustibles traditionnels pour chauffer l'air [47].

Le séchage peut se faire de plusieurs façons. Les machines à sécher existent sous différentes formes selon la manière dont la chaleur est transmise, le coût, le type d'énergie utilisée et la circulation de l'air ou du fluide à l'intérieur de la machine [48].

A - Description d'un séchoir solaire

Le séchoir solaire est un appareil fabriqué pour profiter de la chaleur du soleil afin de sécher les aliments qu'on met à l'intérieur. On peut y faire sécher toutes sortes de produits : fruits, légumes, herbes, poissons et viandes. La structure est souvent en bois et équipée d'une plaque de verre qui retient la chaleur et crée un effet de serre à l'intérieur.

Ce type de séchoir est très utile dans l'agriculture. Il sert à sécher les légumes, les fruits et même certaines plantes médicinales. En utilisant ce système, on diminue la dépendance au séchage traditionnel au soleil et au séchage industriel, ce qui permet d'économiser beaucoup d'énergie provenant des combustibles fossiles [49].

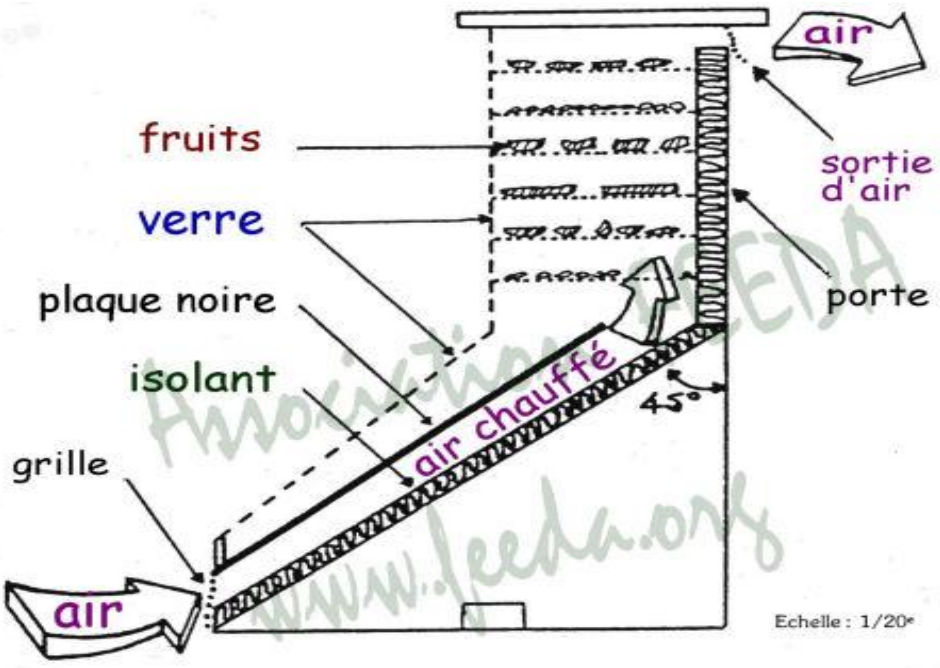


Figure II.13 Illustration d'un séchoir solaire

B -Classification des types de séchoirs solaires :

En fonction du type d'énergie utilisée, on distingue des séchoirs électriques, des séchoirs à gaz et des séchoirs à énergie solaire. Séchage hybride. Il existe diverses catégories de séchoirs solaires : les séchoirs directs et indirects et mixtes [45].

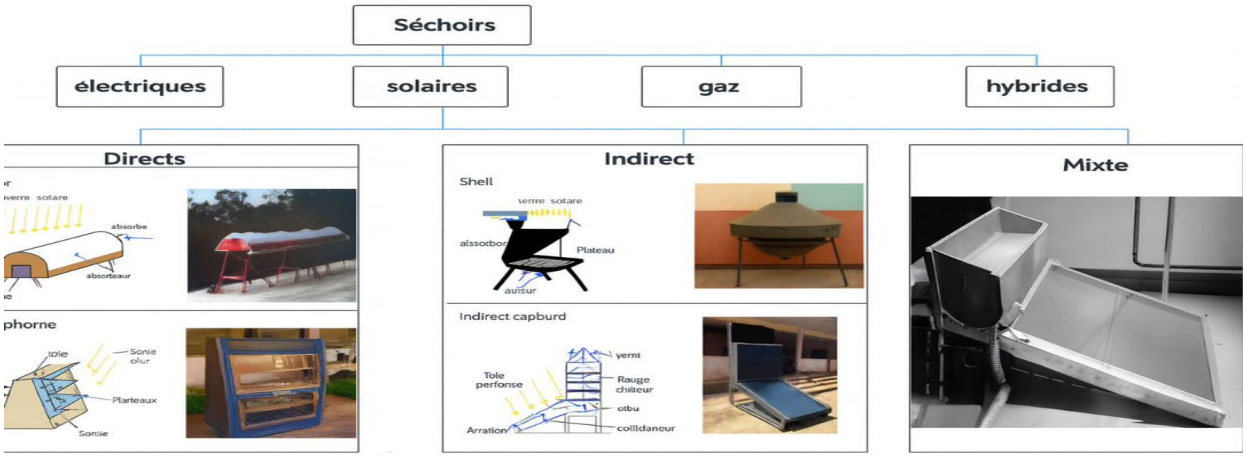


Figure II.14 Schéma représentatif des types de séchoirs solaires

- **Les séchoirs solaires directs**

Dans ce genre de séchoirs, les produits sont directement exposés aux rayons du soleil. Selon la figure 11, le séchoir solaire direct est un dispositif unique qui sert à la fois de collecteur solaire et de chambre de séchage. Le mur de la chambre de séchage est revêtu en noir afin d'améliorer son pouvoir d'absorption thermique. Un panneau de plastique ou polyéthylène transparent est habituellement utilisé comme couverture, mais on peut aussi recourir à d'autres matériaux plus coûteux tels que le verre ou des plastiques spécifiques (polyéthylènes pour l'agriculture). Toutefois, l'interaction directe entre le « rayonnement solaire et le produit » entraîne la détérioration de la qualité du produit ainsi que la destruction des nutriments [50].

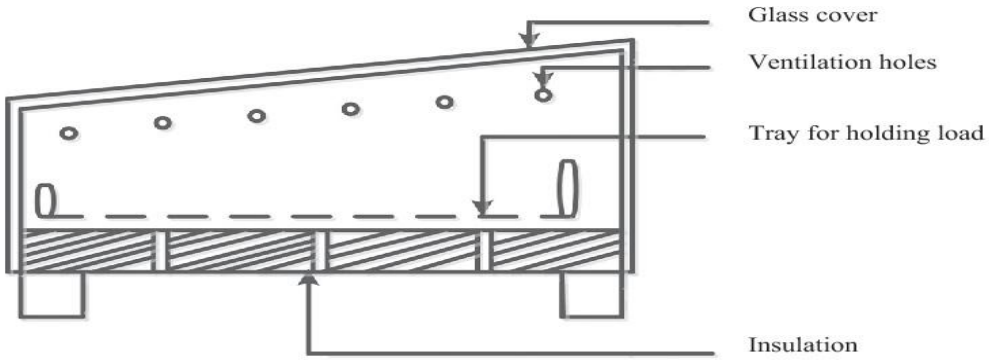


Figure II.15 séchoir solaire direct.

- **Les séchoirs Indirects**

Les systèmes de séchage solaire indirect disposent d'un capteur solaire indépendant et d'une unité spéciale pour le séchage. Habituellement constitués de quatre composants, à savoir un capteur solaire, une unité de séchage, un ventilateur, ainsi que des conduits pour la circulation de l'air. L'unité de collecte solaire contribue positivement à atteindre des températures supérieures dans un environnement contrôlé.

Toutefois, il est également observable que dans des conditions d'exploitation à des températures quand la chaleur s'accroît, l'efficacité du panneau solaire a souvent tendance à se réduire. Généralement, la majorité des capteurs solaires sont fabriqués en bois ou en métaux et revêtus de matériaux absorbants adéquats tels que le polyéthylène noir pour optimiser l'absorption de chaleur nécessaire au séchage du produit [49].
Le produit n'est pas directement soumis à la lumière du soleil, il est même protégé de celle-ci, ce qui contribue à préserver au maximum les qualités nutritives de l'aliment.

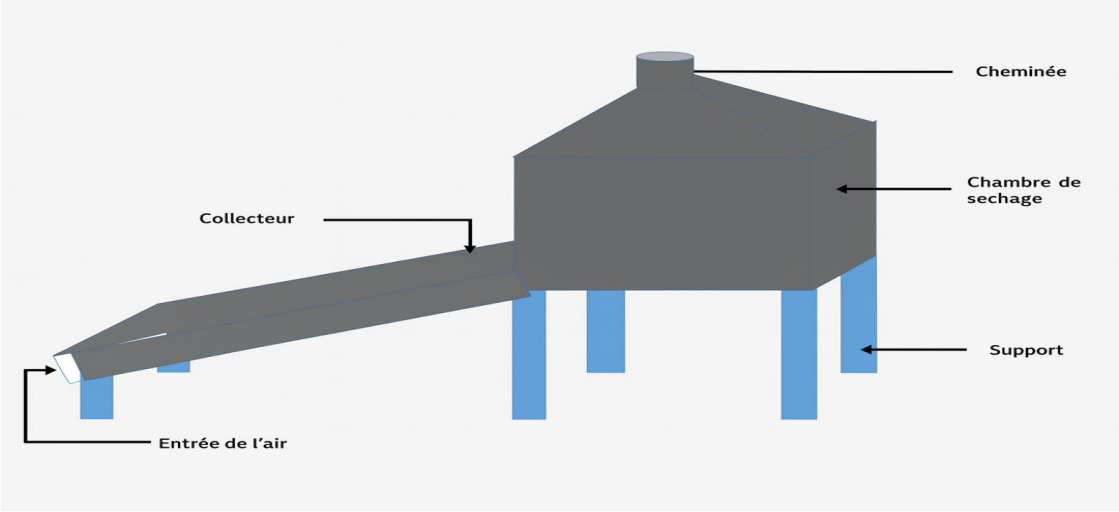


Figure II.16 séchoir solaire indirect

II.3.4.2 Séchage non conventionnel

II.3.4.2.1 Séchage par micro-onde

Les micro-ondes sont des ondes électromagnétiques non ionisantes qui se trouvent dans la bande de fréquence allant de 300 MHz à 300 GHz. Les bandes de fréquences des micro-ondes comprennent trois catégories : l'ultra-haute fréquence (UHF), qui s'étend de 300 MHz à 3 GHz ; la super-haute fréquence (SHF), qui englobe de 3 GHz à 30 GHz ; ainsi que la très haute fréquence (EHF), de 30 GHz à 300 GHz. Actuellement, la fréquence de 2450 MHz est considérée comme la fréquence couramment utilisée pour les fours à micro-ondes domestiques [51].

La méthode de séchage par micro-ondes repose sur la rotation des molécules d'eau. Sous l'effet d'un champ électrique, ces molécules changent de direction et interagissent avec leur environnement et avec les autres molécules, ce qui transforme rapidement l'énergie cinétique de l'eau en énergie thermique (de l'intérieur vers l'extérieur). En revanche, avec le chauffage classique par convection, la chaleur se transmet très lentement, de la surface vers l'intérieur de l'aliment. L'effet des micro-ondes sur une matière dépend de ses propriétés diélectriques, ce qui peut modifier la répartition de la chaleur dans l'échantillon. Pour certains petits aliments, une exposition prolongée aux micro-ondes peut provoquer une surchauffe au centre de l'échantillon. Un facteur clé dans le séchage par micro-ondes est la densité de puissance, c'est-à-dire la quantité d'énergie fournie par unité de surface. [52].

Au cours des vingt dernières années, l'utilisation des micro-ondes pour la transformation des aliments et des produits biologiques a suscité un intérêt croissant [53].

Les méthodes de séchage utilisant les micro-ondes se sont révélées efficaces pour plusieurs types de produits agricoles, notamment les herbes [54].

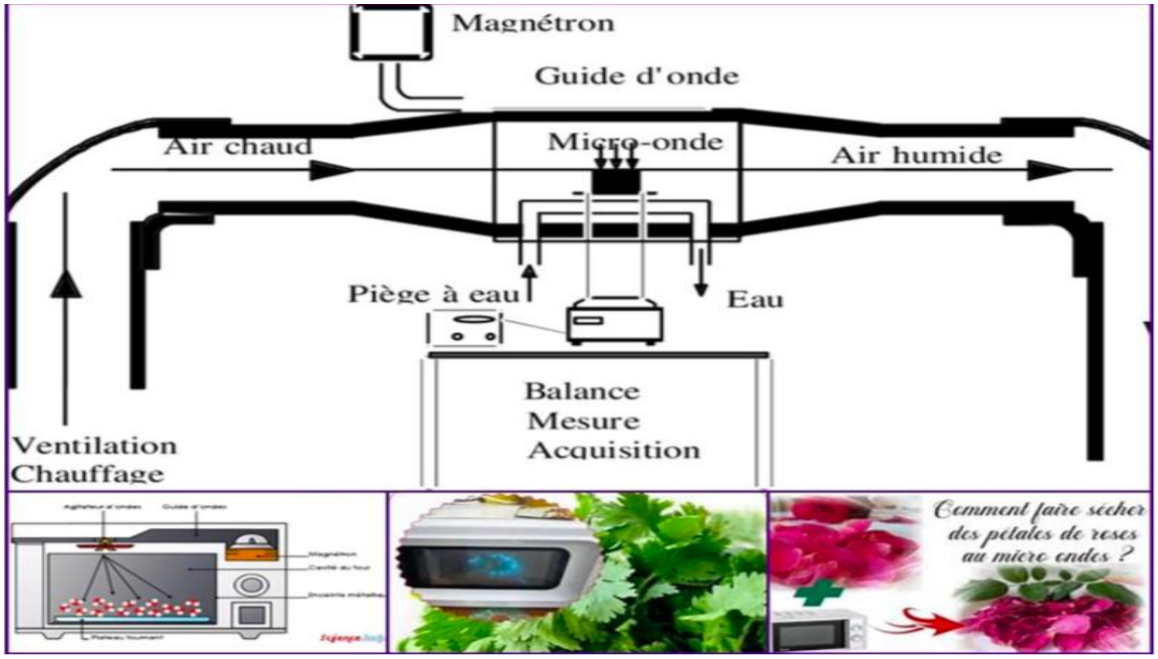


Figure II.17 Principe du séchage par micro-ondes (UHF)

II.3.4.2.2 Séchage osmotique

La déshydratation osmotique consiste à conserver les aliments en les plongeant dans une solution, ce qui les protège mieux que le séchage classique. Les aliments sont chauffés doucement, à des températures comprises entre 5 et 85 °C. Comme ils restent à l'abri de l'air, cette méthode limite les dégâts dus à la chaleur et à l'oxydation. Elle diminue également la présence de microbes, ce qui aide les aliments à se garder plus longtemps [55].

II.3.5 L'utilisation du séchage dans les industries agroalimentaires

Le séchage est une façon très ancienne de conserver les aliments. Il sert surtout à retirer l'eau des produits pour qu'ils se conservent plus longtemps et ne se gâtent pas facilement. On l'utilise aussi pour rendre les produits agricoles plus stables, comme le maïs, le riz, la luzerne ou le lait, et pour gérer les périodes où certains produits ne sont pas disponibles. Le séchage rend les aliments faciles à utiliser plus tard. Par exemple, on peut sécher des légumes pour les ajouter aux soupes, des fruits pour les gâteaux, ou des oignons pour cuisiner facilement. On peut aussi faire des poudres simples, comme des épices ou des arômes, qui servent partout en cuisine.

En plus, les aliments deviennent plus légers et prennent moins de place. C'est plus simple de les ranger et de les transporter. Parfois, leur forme ou leur texture change un peu, comme pour le café instantané ou les flocons de purée, ce qui les rend très pratiques. Quand il est bien fait, il peut même créer des produits pratiques et nouveaux à utiliser dans la cuisine ou l'industrie [39].

II.3.6 Habitudes de séchage en Algérie

En Algérie, on fait souvent sécher les produits agricoles pour les garder plus longtemps. Beaucoup de personnes, surtout dans les zones rurales, ont l'habitude de faire sécher leurs récoltes en les mettant au soleil, souvent sur des bâches, des surfaces dures ou même directement sur le sol, en les étalant en petites couches.

Mais le séchage solaire organisé reste encore peu développé dans le pays. Il est surtout utilisé pour quelques produits comme les fruits, les légumes, ainsi que certaines plantes médicinales et aromatiques [43].



Figure II.18 Technique de séchage solaire des figues par la femme Algérienne

II.3.7 Les domaines d'utilisation

Aujourd'hui, le séchage industriel est partout dans les usines chimiques et de matériaux. Il sert à traiter de nombreux produits pour les rendre plus faciles à utiliser et à conserver.

- Dans le papier, on commence avec une pâte humide, puis on sèche les éponges en cellulose et le latex pour obtenir le produit fini.
- Pour la construction, le bois, les briques, les tuiles et la céramique sont séchés avant cuisson. Les carreaux, les plaques de plâtre, les isolants thermiques et certaines colles passent aussi par cette étape après avoir été moulés ou préparés dans un milieu humide.
- Les produits chimiques solides, comme les engrais, les lessives granulées, le sel, la soude ou la silice, sont séchés après des réactions dans l'eau ou d'autres liquides. Parfois, ils peuvent encore être utilisés sous forme liquide.
- Les poudres pharmaceutiques, issues de procédés humides, passent aussi par le séchage pour pouvoir être manipulées facilement.
- Les textiles sont séchés après lavage ou coloration pour qu'ils soient prêts à l'emploi.
- Enfin, les boues et déchets industriels peuvent être séchés pour réduire leur volume et faciliter leur manipulation [45].

II.3.8 Les avantages et les inconvénients de séchage

Comme toutes les méthodes qui utilisent la chaleur pour garder les aliments, le séchage a ses bons côtés et ses limites.

✓ Les avantages :

Ce qui est bien avec le séchage :

- C'est une méthode facile à mettre en place, pas besoin de beaucoup de matériel compliqué.
- Les aliments peuvent rester bons pendant plusieurs mois sans se gâter.
- Les enzymes qui pourraient faire pourrir les produits sont neutralisées.
- Moins d'eau dans les aliments = moins de bactéries et autres microbes.
- Les producteurs peuvent éviter de perdre trop de récoltes en utilisant cette technique.
- Les aliments séchés sont plus légers et prennent moins de place, donc c'est plus facile de les stocker et de les transporter [56].

✓ Les inconvénients :

Comme toutes les méthodes qui utilisent la chaleur pour garder les aliments, le séchage a aussi quelques inconvénients :

- On peut perdre un peu de goût, de vitamines ou de couleurs, et parfois la surface devient un peu dure ou brunie [57].

- La texture peut changer de façon permanente, ce qui rend plus difficile de réhydrater les aliments, et certains composants s'évaporent.
- L'humidité ne se répartit pas toujours de manière homogène dans le produit.
- Le séchage peut revenir assez cher, surtout à cause de l'énergie qu'il demande. C'est pour ça qu'il vaut mieux savoir ce qui peut influencer la façon dont les aliments sèchent, et surtout la vitesse, pour ne pas gaspiller d'argent.

Mais malgré ça, le séchage reste plus simple et moins compliqué que d'autres méthodes comme la stérilisation, la congélation ou les traitements aseptiques. On l'utilise encore beaucoup pour conserver les fruits, les légumes et les épices [58].

II.4 Conclusion

L'énergie solaire est une ressource précieuse et qui ne s'épuise pas. On peut la transformer en plusieurs formes d'énergie qu'on peut utiliser dans la vie de tous les jours. Pour profiter de cette énergie, on utilise des capteurs solaires, qu'ils soient thermiques ou photovoltaïques. Ces capteurs sont vraiment importants si l'on veut passer à des sources d'énergie plus propres et durables.

Parmi les façons d'utiliser l'énergie solaire, le séchage solaire est l'une des plus utiles. Il repose sur différentes méthodes et outils pour que ça fonctionne bien. On choisit les méthodes et les matériaux en fonction de ce qu'on veut sécher, pour que la chaleur passe bien partout et que le produit reste en bon état tout au long du séchage.

Chapitre III :
Dispositif expérimental

Chapitre III Dispositif expérimental

III.1 Description du séchoir solaire réalisé

Dans le cadre de cette étude, un séchoir solaire indirect à convection forcée a été conçu et réalisé afin d'exploiter l'énergie solaire pour le séchage des produits agricoles. Le système se compose principalement d'un capteur solaire, d'une chambre de séchage et d'un ventilateur assurant la circulation de l'air chaud. Les dimensions des différents composants du séchoir sont présentées dans le tableau suivant.

Table III-1 Dimensions principales du séchoir solaire

Élément	Dimension (cm)
Longueur du capteur solaire	100
Largeur du capteur solaire	50
Hauteur du capteur solaire	15
Angle d'inclinaison du capteur	43°
Hauteur de la chambre de séchage	100
Largeur de la chambre de séchage	48
Profondeur de la chambre de séchage	40
Hauteur du support métallique	73
Hauteur totale du séchoir	173
Nombre de claies	4
Dimensions d'une claie	24 × 19

III.2 Matériaux utilisés

Le séchoir solaire a été fabriqué à partir de matériaux simples, disponibles localement et présentant une bonne résistance aux conditions climatiques.

Table III-2 Matériaux de construction du séchoir solaire

Composant	Matériau
Châssis	Acier soudé
Chambre de séchage	Tôle galvanisée
Capteur solaire	Tôle métallique peinte en noir
Surface absorbante	Peinture noire mate
Couverture du capteur	Verre transparent
Claies de séchage	Grillage métallique alimentaire
Isolation thermique	Polystyrène expansé
Système de ventilation	Ventilateur électrique
Fixations	Vis et boulons

III.3 Avantages du séchoir réalisé

Le séchoir solaire conçu présente plusieurs avantages :

- Utilisation d'une source d'énergie renouvelable et gratuite.
- Réduction significative du temps de séchage par rapport au séchage traditionnel à l'air libre.
- Protection des produits contre la poussière, les insectes et les intempéries.
- Amélioration de la qualité hygiénique des produits séchés.
- Faible coût de fabrication et de maintenance.
- Facilité d'utilisation et de déplacement grâce à sa structure mobile.

III.4 Réalisation du séchoir solaire intelligent

Après la sélection des matériaux et la préparation des différents composants, les étapes de réalisation du séchoir solaire intelligent ont été effectuées progressivement. Les figures suivantes présentent les principales étapes de fabrication et d'intégration du système, depuis la chambre de séchage jusqu'au système de commande et de communication, ainsi que la préparation des essais expérimentaux.



Figure III.1 Modèle 3D du séchoir solaire intelligent



Figure III.2 Réalisation de la chambre de séchage







Figure III.3 Réalisation du capteur solaire



Figure III.4 Système de commande et de communication du séchoir solaire

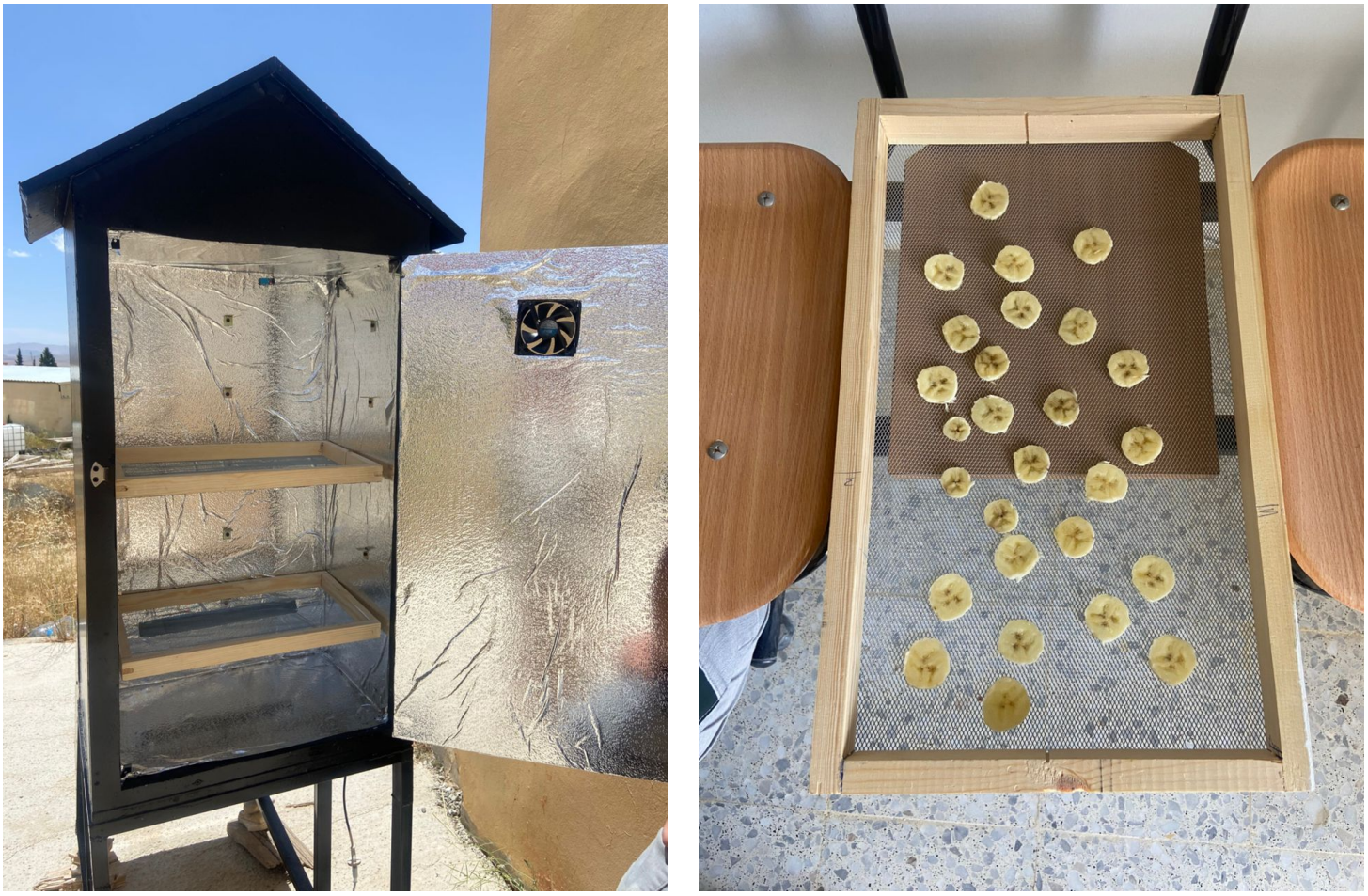


Figure III.5 Préparation des essais expérimentaux de séchage de la banane



Figure III.6 Prototype final du séchoir solaire

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Chapitre IV Résultats et Discussion

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats expérimentaux obtenus à partir du séchoir solaire intelligent réalisé sont présentés et analysés. Les essais ont été effectués afin d'évaluer les performances du système dans des conditions réelles de fonctionnement. Les paramètres principaux, tels que la température et l'humidité relative à l'intérieur de la chambre de séchage, ont été suivis et enregistrés tout au long du processus.

L'objectif de cette étude est de vérifier l'efficacité du séchoir conçu, d'analyser son comportement thermique et d'évaluer sa capacité à assurer des conditions favorables au séchage. Les résultats obtenus sont ensuite discutés afin de mettre en évidence les avantages et les performances du système développé.

IV.2 Présentation et analyse des résultats

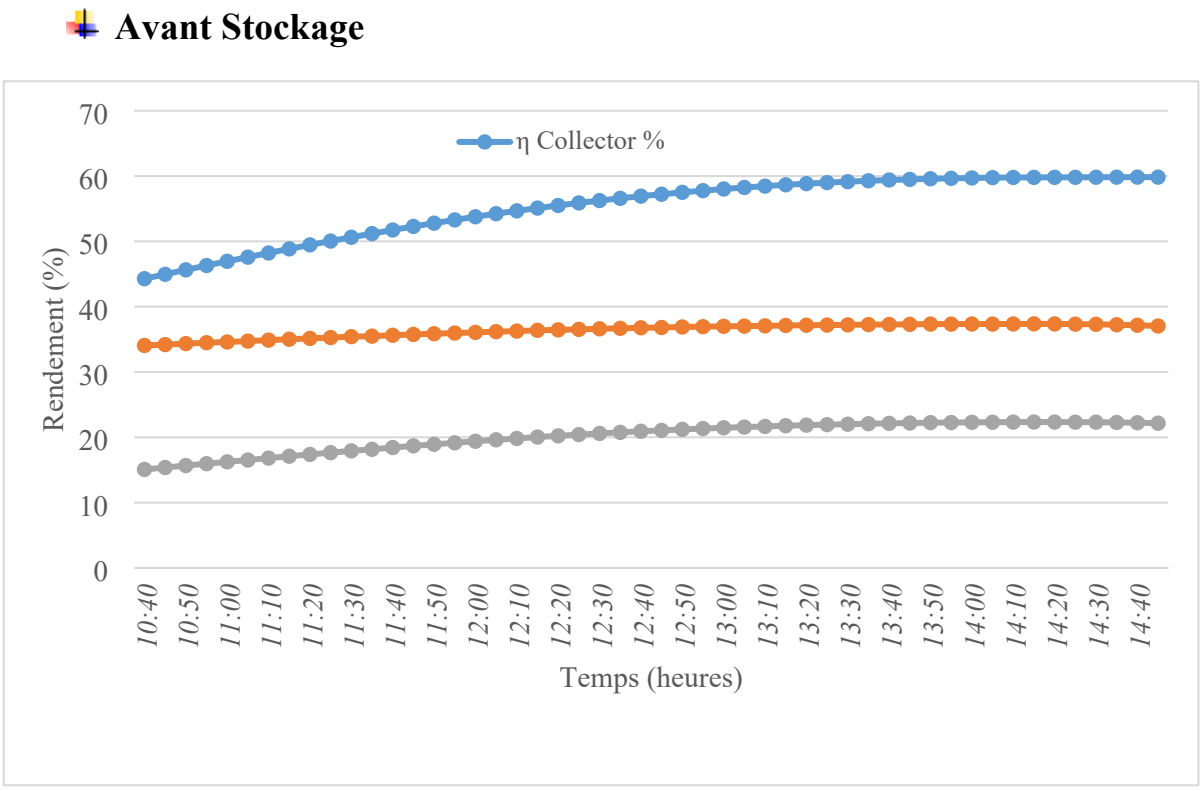


Figure IV.1 Évolution des rendements du collecteur, du séchoir et du rendement global en fonction du temps avant stockage.

Analyses des courbes

La figure montre l'évolution Des rendements mesurés dans le capteur solaire, la chambre de séchage et l'ambiance au cours de la journée. On observe une augmentation progressive des températures durant la matinée en raison de l'intensification du rayonnement solaire. Les températures atteignent leurs valeurs maximales autour de midi, puis diminuent progressivement en fin d'après-midi avec la baisse de l'ensoleillement. La température du capteur reste supérieure à celle de la chambre de séchage et de l'ambiance, ce qui confirme son efficacité à fournir l'énergie thermique nécessaire au processus de séchage.

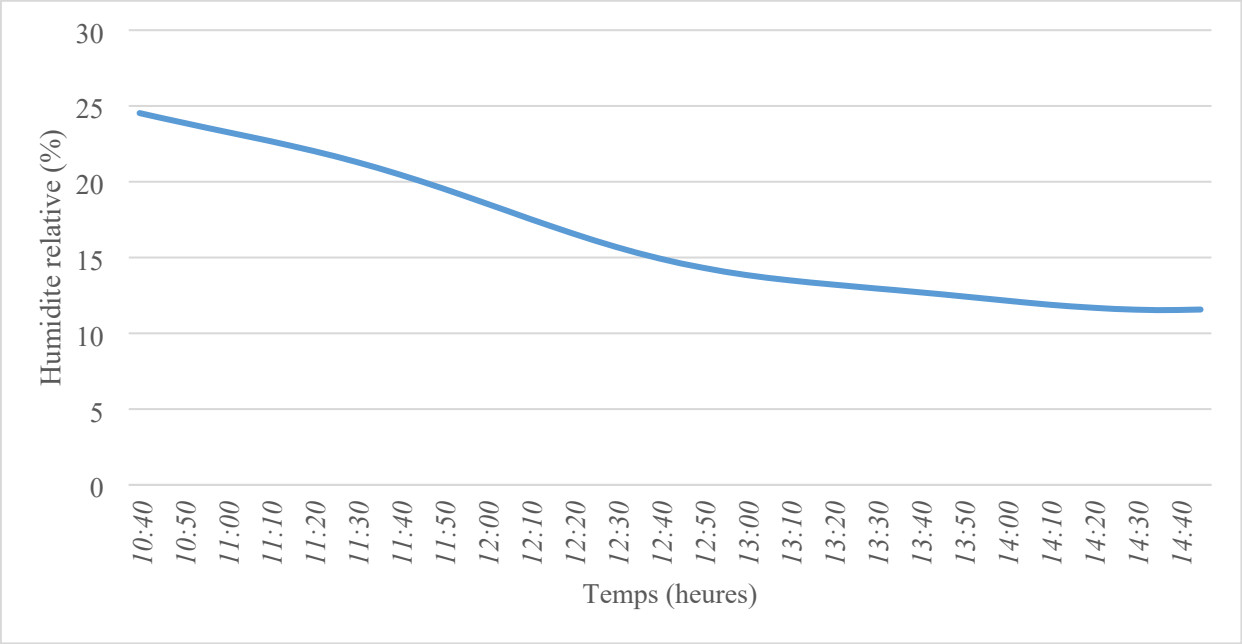


Figure IV.2 Évolution de l'humidité relative de l'air dans la chambre de séchage

Analyses des courbes

La figure présente la variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage et dans l'air ambiant. Une diminution progressive de l'humidité relative est observée pendant les heures de fort ensoleillement, ce qui favorise l'évaporation de l'eau contenue dans le produit. Les valeurs minimales sont enregistrées aux heures les plus chaudes de la journée. En fin d'après-midi, l'humidité relative augmente légèrement en raison de la baisse de la température et de la réduction de l'intensité solaire.

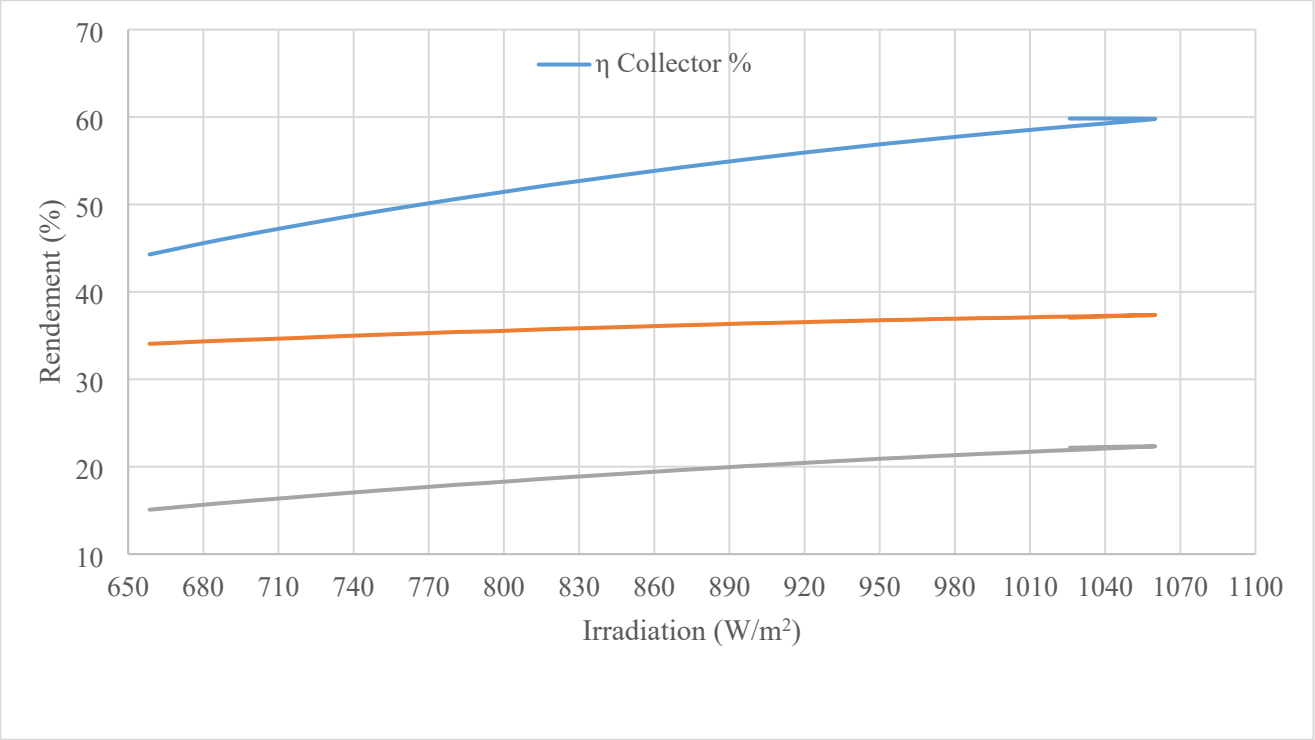


Figure IV.3 Variation des rendements du collecteur, du séchoir et du rendement global en fonction de l'irradiation solaire avant stockage

Analyses des courbes

La figure illustre l'évolution de la teneur en eau (ou de la masse) du produit au cours du séchage avant stockage. On constate une diminution continue de la teneur en eau avec le temps, traduisant l'élimination progressive de l'humidité contenue dans le produit sous l'effet de l'air chaud circulant dans le séchoir. La vitesse de séchage est plus importante durant les périodes de température élevée, puis ralentit progressivement à mesure que la quantité d'eau résiduelle dans le produit diminue. Cette évolution confirme l'efficacité du séchoir solaire dans la réduction de l'humidité avant l'étape de stockage.

Apres Stockage

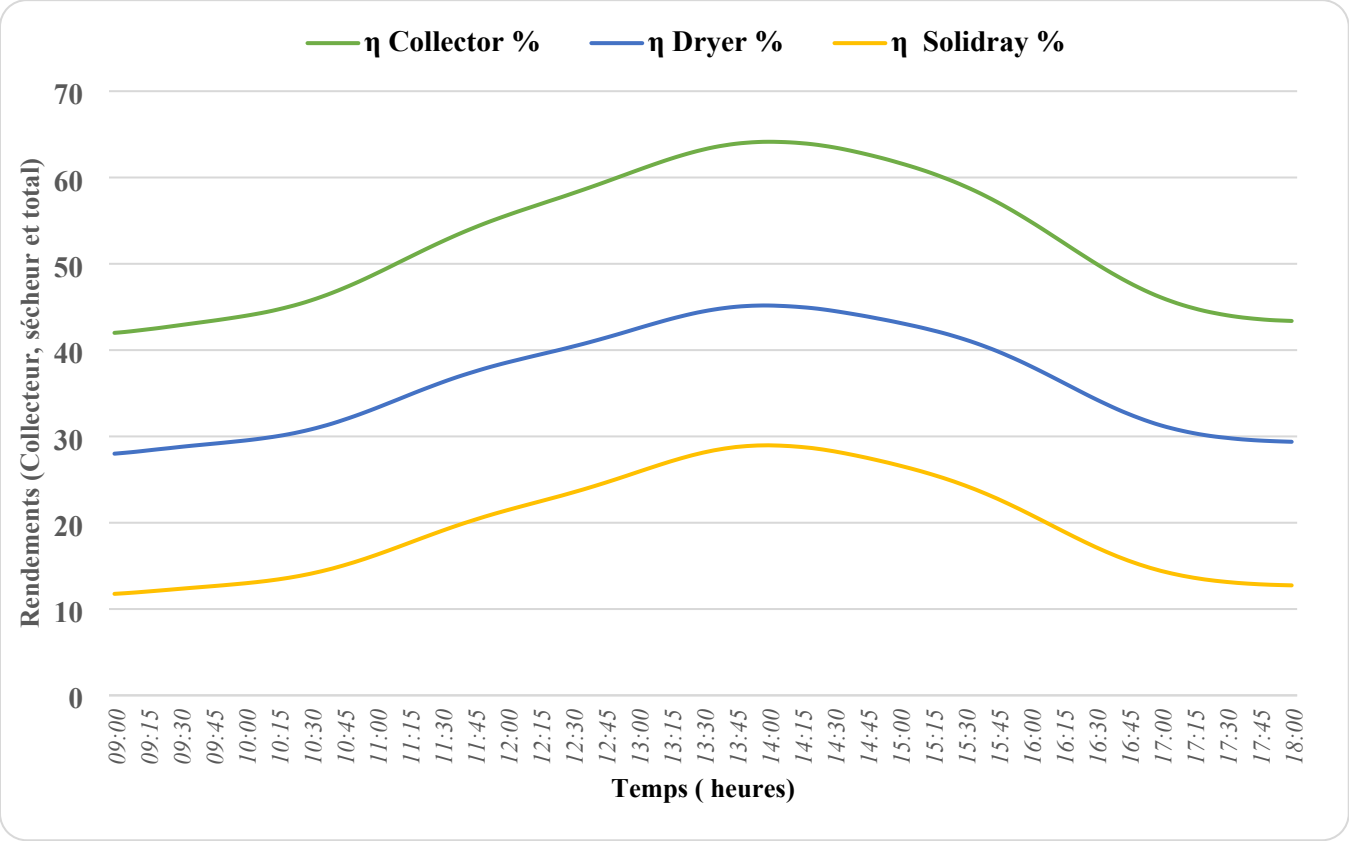


Figure IV.4: Rendement en fonction de temps

Analyses des courbes

La figure présente l'évolution du rendement du collecteur solaire, du séchoir et du rendement global au cours de la journée. On observe une augmentation progressive des rendements durant la matinée, atteignant leurs valeurs maximales pendant les heures de fort ensoleillement. Par la suite, les rendements diminuent progressivement en fin d'après-midi en raison de la baisse du rayonnement solaire. Cette évolution montre que les performances du système dépendent fortement de l'énergie solaire disponible.

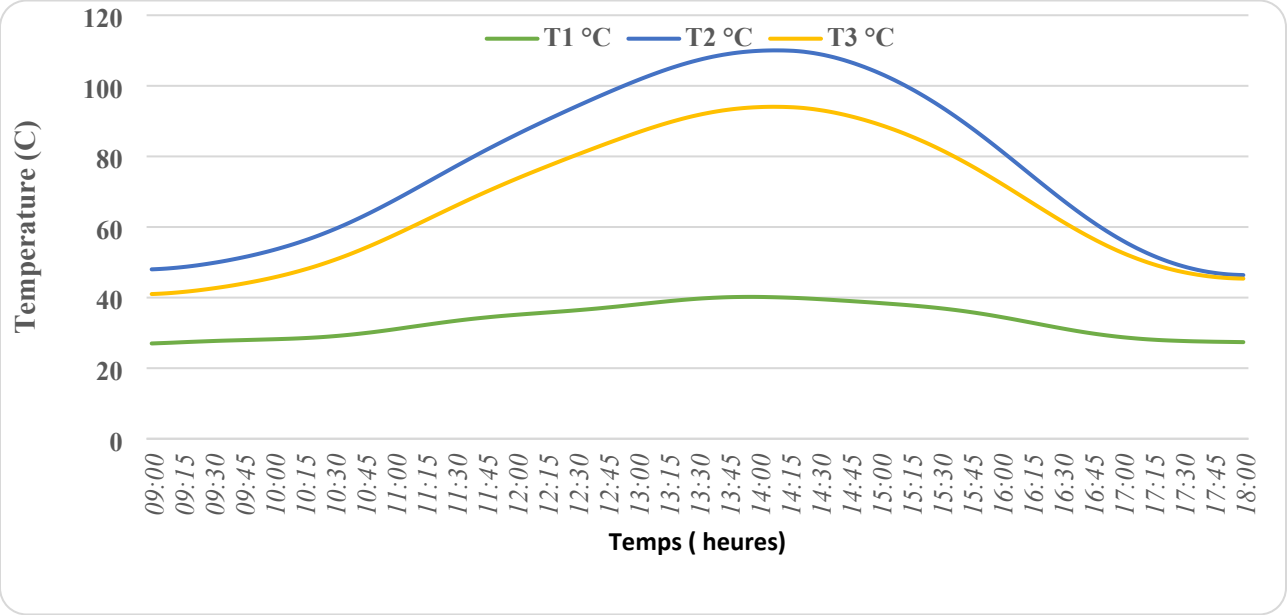


Figure IV.5 Évolution des températures T1, T2 et T3 au cours de la journée.

Analyses des courbes

La figure montre l'évolution des températures mesurées à différents points du système. Les températures augmentent progressivement depuis le début de la journée jusqu'à atteindre un maximum vers midi, puis diminuent graduellement. La température T2 reste la plus élevée, ce qui confirme l'efficacité du capteur solaire dans le chauffage de l'air avant son entrée dans la chambre de séchage.

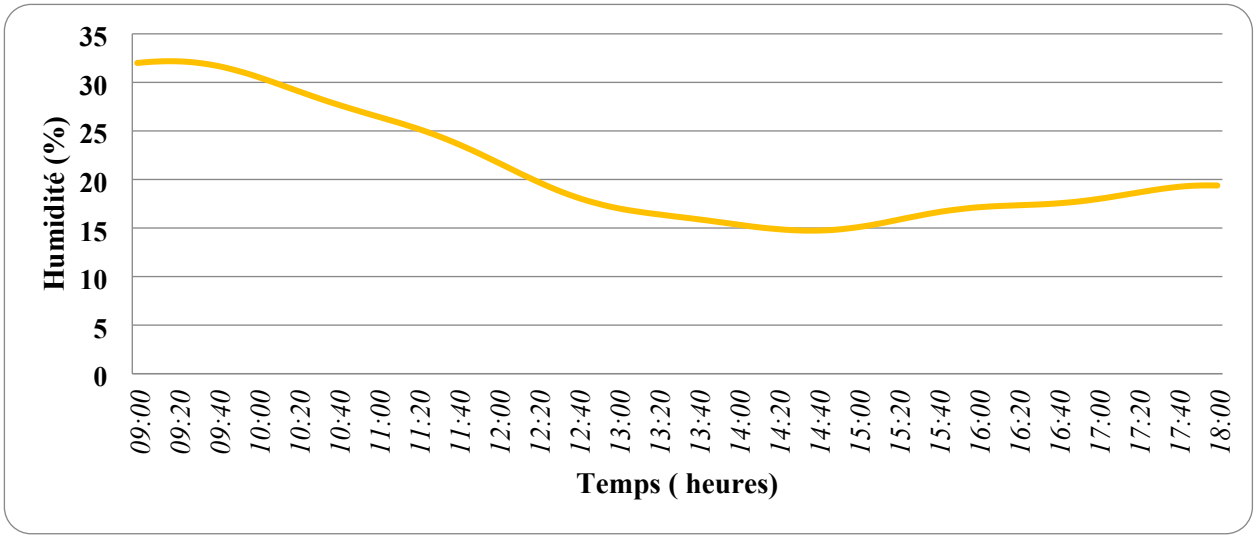


Figure IV.6 Variation de l'humidité relative en fonction du temps.

La courbe de l'humidité relative présente une diminution progressive au cours de la journée. Cette baisse est liée à l'augmentation de la température et de l'irradiation solaire. La réduction de l'humidité favorise l'évaporation de l'eau contenue dans le produit et améliore ainsi l'efficacité du processus de séchage.

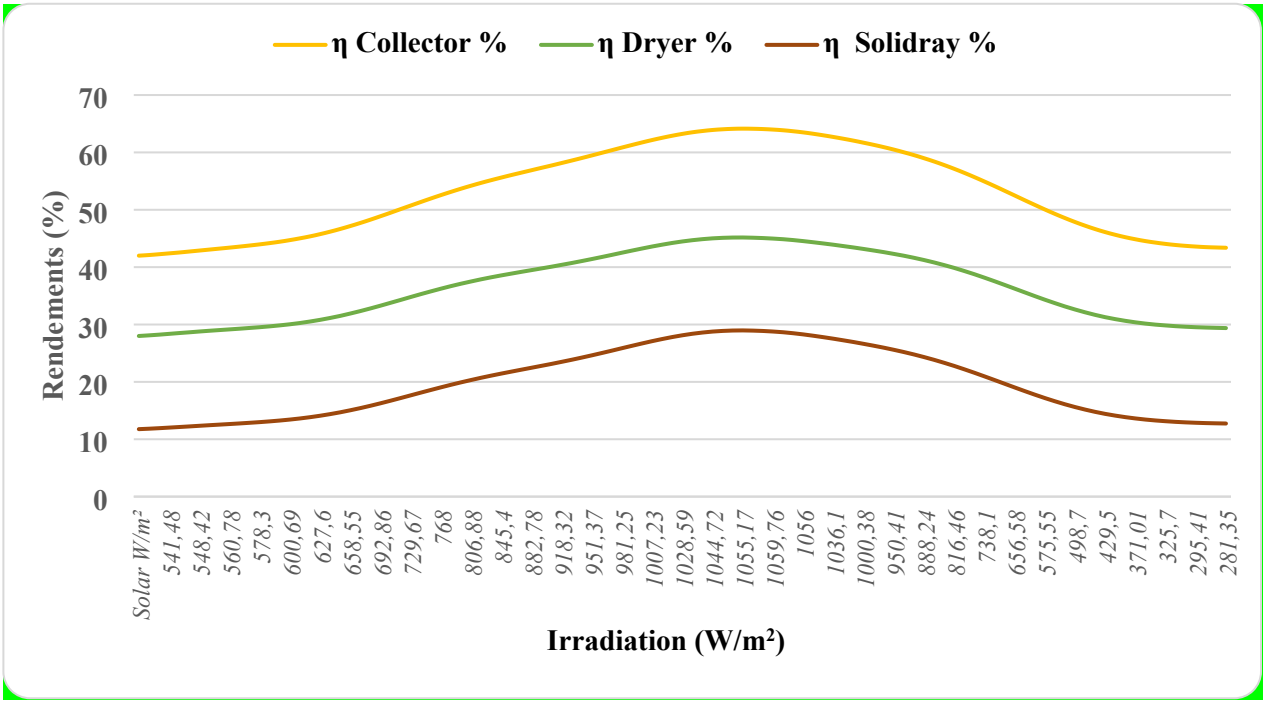


Figure IV.7 Évolution simultanée de l'irradiation solaire et des rendements du système de séchage solaire.

Analyses des courbes

Cette figure met en évidence l'influence directe de l'irradiation solaire sur les performances du système. L'irradiation augmente progressivement pour atteindre un maximum aux heures de midi, puis diminue en fin de journée. Les rendements du collecteur, du séchoir et du système global suivent la même tendance, ce qui confirme la forte corrélation entre l'énergie solaire reçue et l'efficacité du séchage.

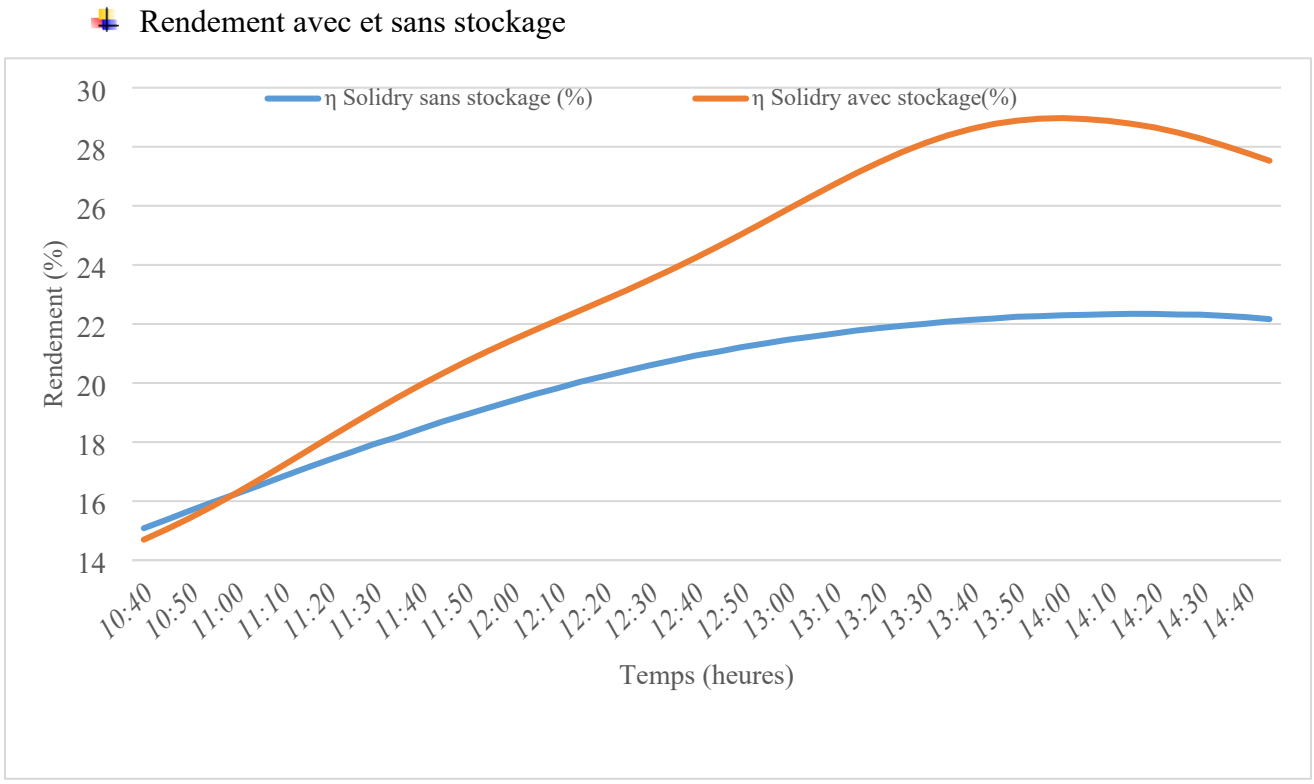


Figure IV.8 Comparaison du rendement global du séchoir avec et sans stockage thermique

Analyses des courbes

La figure présente une comparaison entre le rendement global du séchoir solaire avec stockage thermique et sans stockage thermique au cours de la période de séchage. On observe que les deux rendements augmentent progressivement avec le temps sous l'effet de l'augmentation de l'irradiation solaire. Toutefois, le rendement du système équipé d'un stockage thermique reste supérieur à celui du système sans stockage pendant toute la durée de l'expérience. Le rendement avec stockage atteint une valeur maximale d'environ 29 %, tandis que celui sans stockage ne dépasse pas 22 %. Cette amélioration s'explique par la capacité du matériau de stockage à accumuler l'énergie thermique pendant les périodes de fort ensoleillement et à la restituer progressivement, ce qui permet de maintenir des conditions de séchage plus favorables. Ces résultats confirment l'intérêt du stockage thermique pour améliorer les performances et la stabilité du séchoir solaire

IV.3 Conclusion

Les résultats obtenus ont permis d'évaluer les performances du séchoir solaire dans différentes conditions de fonctionnement, avant et après l'intégration d'un système de stockage thermique. L'analyse des courbes a montré une relation directe entre l'irradiation solaire, la température de l'air de séchage, l'humidité relative et le rendement global du système.

Les résultats indiquent que l'augmentation de l'irradiation solaire entraîne une élévation des températures à l'intérieur du séchoir ainsi qu'une diminution de l'humidité relative, ce qui favorise le processus de séchage. Les rendements du collecteur, du séchoir et du système global évoluent suivant la même tendance que l'irradiation solaire, atteignant leurs valeurs maximales durant les heures de fort ensoleillement.

Par ailleurs, la comparaison entre le fonctionnement avec et sans stockage thermique a mis en évidence l'apport positif du matériau de stockage. En effet, le stockage thermique permet de conserver une partie de l'énergie solaire absorbée et de la restituer progressivement, ce qui améliore le rendement global du système et assure une meilleure stabilité des conditions de séchage.

Ainsi, les résultats obtenus confirment l'efficacité du séchoir solaire proposé et démontrent que l'intégration d'un système de stockage thermique constitue une solution pertinente pour améliorer les performances énergétiques du procédé de séchage et prolonger son fonctionnement dans des conditions plus favorables.

Conclusion générale

Dans le contexte actuel de la transition énergétique et de la valorisation des ressources renouvelables, l'énergie solaire apparaît comme une solution durable et économique pour de nombreuses applications thermiques, notamment le séchage des produits agricoles. Grâce à son important potentiel solaire, l'Algérie dispose d'atouts considérables pour le développement de technologies de séchage utilisant cette source d'énergie propre.

Ce travail a porté sur l'étude, la conception et l'évaluation d'un séchoir solaire intelligent équipé d'un capteur solaire thermique et d'un système de surveillance basé sur l'Internet des Objets (IoT). Une étude bibliographique a d'abord permis de présenter les notions fondamentales liées au rayonnement solaire, aux capteurs solaires thermiques et aux différentes techniques de séchage solaire. Cette analyse a également mis en évidence l'intérêt croissant des systèmes intelligents dans l'amélioration des performances des procédés de séchage.

La réalisation du prototype a permis d'intégrer plusieurs éléments essentiels tels que le capteur solaire à air, la chambre de séchage, les capteurs de température et d'humidité ainsi qu'un système de suivi en temps réel. Les essais expérimentaux effectués ont montré une élévation significative de la température de l'air à l'intérieur du système, favorisant ainsi l'évacuation de l'humidité et l'amélioration des conditions de séchage. Les résultats obtenus confirment également l'influence directe du rayonnement solaire sur les performances thermiques du séchoir et sur son rendement global.

L'intégration de la technologie IoT a constitué une valeur ajoutée importante en permettant la surveillance continue des paramètres de fonctionnement et l'accès à distance aux données de séchage. Cette solution contribue à une meilleure maîtrise du procédé, à la réduction des pertes post-récolte et à l'amélioration de la qualité des produits séchés.

Les résultats obtenus démontrent donc la faisabilité technique et l'efficacité du séchoir solaire intelligent proposé. Ce système représente une alternative écologique et économique aux méthodes conventionnelles de séchage tout en répondant aux besoins de modernisation du secteur agricole.

Comme perspectives, il serait intéressant d'optimiser le système de stockage thermique intégré et d'évaluer d'autres matériaux à changement de phase afin d'améliorer davantage les performances du séchoir.

En définitive, cette étude confirme que l'association de l'énergie solaire thermique et des technologies intelligentes constitue une voie prometteuse pour le développement de solutions de séchage performantes, durables et adaptées aux conditions climatiques de l'Algérie.

Bibliographie

[1] B. Abdelaziz, Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur, Ouargla: U Kasdi Merbah Ouargla, 2012.

[2] P. W. Z. Zhang, "Highly stable copper oxide composite as an effective photocathode for water splitting via a facile electrochemical synthesis strategy," *Journal of Materials Chemistry,* vol. 22, p. 2456–2464, 2021.

[3] "http://www.bulipi-eee.tuiasi.ro/archive/2011/fasc.5/p14_f5_2011.pdf," 2011. [Online].

[4] "http://victoirekephale.wordpress.com/2014/06/06," [Online].

[5] "https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/1-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-biomasse," [Online].

[6] B.SORENSEN, Renewable Energy, 1st ed., A. Press, Ed., London, 1979.

[7] M. Adem, "«Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance»," Toulouse, 2005.

[8] "http://System.solaire.free.fr/soleil.htm," [Online].

[9] K. Essaghir, " « Etude expérimentale et théorique du gisement solaire pour la région de M'sila »," 2019.

[10] E. a. e. bouziani, "' Le gisement solaire'," Kenitra 'Maroc', 2014.

[11] B. S. J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, "" Le pompage photovoltaïque, Mémoire de magister en Automatique "," Ottawa, 1998.

[12] J. LABBÉ, "" l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isoles "," paris, 21 décembre 2006.

[13] S. O, "Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire," Constantine, 2009.

[14] D. A and A. B. W, Solar engineering of thermal processes, J. W. a. Sons, Ed., New York, 1980.

[15] M. .IQBAL, 'An introduction to solar radiation', A. press, Ed., New York, 1983.

[16] A. Azadeh, A. Maghsoudi and S. Sohrabkhani, "An integrated artificial neural networks approach for predicting global radiation," *Energy Conversion and Management,* 2010.

[17] F.Baghdadi, "Cours: Energies renouvelables," Bouira.

[18] Nasution, R. Agustina and M. A. Fauza, "“Deep bed drying performance on paddy using hybrid infrared-solar dryer”," *GSC Advanced Research and Reviews,* Vols. vol. 22, no. 02, pp. pp. 014-025, 2025.

[19] R. Khama, "“Assessing the feasibility of solar drying for fruits and vegetables in El Hodna region, M’sila, Algeria”," *GSC Advanced Research and Reviews,* Vols. vol. 22, no. 03, pp. pp. 026-037, 2024.

[20] H. Jafarishad, M. Li, Y. Shen, P. S. Takhar and Y. Liu, "Intensity-modulated optical fibre strain sensor for continuous measurements of below-the-surface food deformation during drying," *Biosystems Engineering,* vol. 238, p. 115–127, 2024.

[21] N. Mishra, S.K. Jain, N. Agrawal, N.K. Jain, N. Wadhawan and N.L. Panwar, "Development of Drying System by Using Internet of Things for Food Quality Monitoring and Controlling," *Energy Nexus,* vol. 11, 2023.

[22] S. M. Ashtiani and A. Martynenko, "Advances in Soft Sensors for Smart Food Drying: Innovations, Challenges, and Industrial Perspectives," *Journal of Food Process Engineering,* vol. 48, 2025.

[23] B. B. Sharmal, P. Vaidya, N. Kumar, A. Tiwari, S. Bansal, M. R. I. Faruques and K. S. Al-mugren, "“Enhancing post-harvest sustainability in temperate crops through smart IoT-integrated indirect solar dryer”," *Scientific Reports,* 05 August 2025.

[24] R. Khargotra, R. Kumar, A. Kovács and T. Singh, "Techno-economic analysis of solar thermal collector for sustainable built environment," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,* 2023.

[25] S. M. E. A. Bekkouche, "Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires," *Thèse de Doctorat,* 2009.

[26] R. Sadeghi, M. Parenti, S. Memme, M. Fossa and S. Morchio, "A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems," *DIME Department of Mechanical, Energy, Management and Transportation Engineering, University of Genova, Italy,* 2025.

[27] M. Kchaou, "Solar Water Heating Systems: A Review on Contemporary Design and Emergent Technology using PCM for Increased Performance," *Engineering, Technology,* vol. 14, p. 12494–12500, 2024.

[28] Suman Debnath, Papiya Bhowmik, Gaurav Arora and Manoj Kumar Singh, "Solar collectors for a sustainable future: innovations and energy efficiency trends," *Discover Applied Sciences,* vol. 7, no. 11, 2025.

[29] E. King'ori and I. N. Simate, "Design and Development of a Parabolic Trough Solar Air Heater for a Greenhouse Dryer," *Journal of Power and Energy Engineering,* vol. 12, p. 1–18, 2024.

[30] F. Abbassi, Réalisation d'un capteur solaire thermique, Ouargla: Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2023.

[31] B. Nada, Étude des performances d'un collecteur solaire plan incliné, Annaba: Université Badji Mokhtar – Annaba, 2023.

[32] K.Salima, Étude théorique et numérique des systèmes couplés : distillateur plan-capteur et distillateur hotbox-capteur, Thèse de Magister, 2009.

[33] D. Ababsa, Optimisation du rendement d'un capteur solaire par minimisation des pertes convectives, Batna, Département de physique: Faculté des sciences, Université de Batna, 2010.

[34] Université Alioune Diop de Bambey, "Capteur solaire thermique," Université Alioune Diop de Bambey, Bambey, 2015.

[35] L. Maifi, "Étude et modélisation d'un panneau solaire thermique photovoltaïque," Constantine, 2018.

[36] F. A. Peuser, K. H. Remmers and M. Schnauss, Installations solaires thermiques : conception et mise en œuvre, 2005.

[37] J. Bernard, Énergie solaire : calculs et optimisation, Nouvelle éd ed., Ellipses, Ed., Paris, 2011.

[38] A. Degiovanni, "Transmission de l'énergie thermique – Conduction," 1999.

[39] C. Bonazzi and J. Bimbenet, "Séchage des produits alimentaires : Principes," *Techniques de l'ingénieur, Agroalimentaire,* vol. F3000, 2003.

[40] C. Bonazzi and E. e. a. Dumoulin, "Le séchage des produits alimentaires," *Industrie Alimentaire et Agricole,* vol. 125(03–04), p. 12–22, 2008.

[41] S. El Mokretar, R. Miri and M. Belhamel, "Étude du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir de type serre : applications au séchage des produits agroalimentaires," CDER (Centre de Développement des Énergies Renouvelables – Algérie), Alger, 2004.

[42] S. Perino and F. Chemat, "Chauffage micro-ondes comme éco-procédé en industrie agroalimentaire," INPT, Toulouse, 2015.

[43] S. Boughali, Étude et optimisation du séchage solaire des produits agroalimentaires dans les zones arides et désertiques, Batna: Université de Batna 2, 2010.

[44] C. Bonazzi and E. Dumoulin, Quality changes in food materials as influenced by drying processes, vol. 3, Weinheim: Wiley-VCH, 2011, p. 1–20.

[45] J. Vasseur, Séchage : principes et calcul d'appareils — Séchage convectif par air chaud (partie 1), Techniques de l'Ingénieur, 2009.

[46] E. Wolff and H. Gibert, "Développements technologiques nouveaux en lyophilisation," *Journal of Food Engineering,* vol. 8, no. 2, p. 91–108, 1988.

[47] A. Midilli and H. Kucuk, "Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio," *Energy,* vol. 28, no. 6, p. 539–556, 2003.

[48] X. Amelin and S. Souriau, "Fabrication de cuiseurs et de séchoirs solaires," CTA, 2014.

[49] M. Mann and e. al, "Renewable and sustainable energy reviews," 2004.

[50] A. Madhlopa and e. al, "A solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration," *Renewable Energy,* vol. 27, no. 1, pp. 27-37, 2002.

[51] K. E. Haque, "Microwave energy for mineral treatment processes: a brief review," *International Journal of Mineral Processing,* vol. 57, no. 1, pp. 1-24, 1999.

[52] J. Dehghannya, S.-H. Hosseinlar and M. K. Heshmati, "Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying," *Innovative Food Science & Emerging Technologies,* vol. 25, pp. 132-151, 2018.

[53] W. M. Cheng, G. Raghavan, M. Ngadi and N. Wang, "Microwave power control strategies on the drying process I: Development and evaluation of new microwave drying system," *Journal of Food Engineering,* vol. 76, no. 2, pp. 188-194, 2006.

[54] I. A. Ozkan, B. Akbudak and N. Akbudak, "Microwave drying characteristics of spinach," *Journal of Food Engineering,* vol. 2, no. 78, pp. 577-583, 2007.

[55] B. Bchir, S. Besbes, J.-M. Giet, H. Attia and C. Blecker, "Synthèse des connaissances sur la déshydratation osmotique / Synthesis of knowledge about osmotic dehydration," *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement,* vol. 15, no. 1, p. 129, 2011.

[56] V. Fournier, "Conservation des aliments," Université Laval, Canada, 2003.

[57] T. Boroze and T. E., "Outil d'aide à la conception de séchoirs pour les produits agricoles tropicaux," 2011.

[58] O. V. Ekechukwu and B. Norton, "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology," *Energy Conversion and Management,* vol. 40, no. 6, pp. 615-655, 1999.

[59]

ملحق حاضنة الاعمال

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد البشير الابراهيمي

عنوان المشروع:

Etude et réalisation d'un sécheur solaire destiné aux fruits et légumes

مشروع لنيل شهادة مؤسسة ناشئة في إطار القرار الوزاري 1275

صورة العلامة التجارية



الاسم التجاري

SOLIDRY

السنة الجامعية

2025_2026

فريق الاشراف:

فريق الاشراف	
المشرف الرئيسي (1): انيس امخلاف	التخصص: هندسة ميكانيكية
المشرف (2): سليم داودي	التخصص: الكتروميكانيك
المشرف المساعد: عوكلي زكرياء	التخصص: فيزياء طاقوية وطاقات متجددة

فريق العمل:

فريق المشروع	التخصص	الكلية
الطالبة: شليك نورهان	فيزياء طاقوية وطاقات متجددة	كلية العلوم والتكنولوجيا
الطالبة: ميهوبي اكرام	فيزياء طاقوية وطاقات متجددة	كلية العلوم والتكنولوجيا

فهرس المحتويات

المحور الأول: تقديم المشروع

المحور الثاني: الجوانب الابتكارية

المحور الثالث: التحليل الاستراتيجي للسوق

المحور الرابع: خطة الإنتاج والتنظيم

المحور الخامس: النموذج الاولي التجريبي

المحور السادس: الخطة المالية

المحور الأول: تقديم المشروع

1. فكرة المشروع المقترح

يتمثل مجال نشاط مشروعنا في الصناعات المرتبطة بالطاقات المتجددة والتجهيزات الفلاحية الذكية، حيث يهدف إلى تصميم وإنجاز مجفف شمسي ذكي مخصص لتجفيف المنتجات الفلاحية والغذائية باستعمال الطاقة الشمسية.

بدأت فكرة المشروع من الحاجة إلى إيجاد وسيلة تجفيف اقتصادية وصديقة للبيئة تمكن الفلاحين والمنتجين من المحافظة على جودة منتجاتهم وتقليل الخسائر الناتجة عن طرق التجفيف التقليدية. وقد تطورت الفكرة من مجرد مجفف شمسي عادي إلى نظام ذكي يعتمد على تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) من أجل تحسين عملية التجفيف ومراقبتها عن بعد.

سنقوم بتصميم وتصنيع مجفف شمسي ذكي مزود بتطبيق للتحكم والمراقبة عن بعد عبر شبكة الانترنات، حيث يسمح التطبيق بمتابعة عملية التجفيف عن بعد، ومراقبة نسبة الرطوبة داخل غرفة التجفيف، إضافة إلى التحكم في تشغيل المروحة وضبط ظروف التجفيف بشكل آني.

يعتمد النظام على مجمع شمسي حراري مزود ب (Élément de stockage) عبارة عن احجار خاصة لتخزين الحرارة حيث تساهم في رفع مردود الحرارة في حضور الشمس وفي غياب الشمس تعتبر كمصدر حراري كما يحتوي على معيقات هوائية داخل المجمع الشمسي لزيادة مدة بقاء الهواء الساخن وتحسين انتقال الحرارة، مما يساهم في رفع كفاءة التجفيف وتقليل استهلاك الطاقة.

سيتم إنجاز المشروع من طرف فريق متعدد التخصصات يجمع بين مهارات الطاقات المتجددة، الفيزياء الطاقوية، والإلكترونيات والبرمجة، بهدف تطوير منتج مبتكر قابل للتسويق والاستغلال في القطاع الفلاحي.

2. القيم المقترحة

- الحداثة: تقديم مجفف شمسي ذكي مزود بتطبيق للمراقبة والتحكم عن بعد عبر شبكة الانترنات، وهي خاصية غير متوفرة في أغلب المجففات الشمسية التقليدية.
- الأداء: تحسين كفاءة التجفيف من خلال مراقبة درجات الحرارة والرطوبة في الزمن الحقيقي، مما يضمن جودة أفضل للمنتجات المجففة.
- التكييف: إمكانية ضبط ظروف التجفيف والتحكم في المروحة حسب نوع المنتج المراد تجفيفه ومتطلبات المستخد

- إنجاز المهمة: مساعدة الفلاحين والمنتجين على تجفيف منتجاتهم بطريقة فعالة مع المحافظة على الجودة وتقليل نسبة التلف.
- التصميم: تصميم عملي يجمع بين الجانب الحراري والجانب الرقمي، مع واجهة تطبيق سهلة الاستعمال.
- السعر: تقليل تكاليف التشغيل بالاعتماد على الطاقة الشمسية كمصدر رئيسي للطاقة.
- خفض التكاليف: تمكين المستخدم من تقليل مصاريف الطاقة وتقليل الخسائر الناتجة عن تلف المنتجات الزراعية.
- الحد من المخاطر: مراقبة مستمرة لظروف التجفيف مما يقلل من مخاطر فساد المنتجات أو انخفاض جودتها.
- سهولة الوصول: إمكانية متابعة عملية التجفيف والتحكم فيها عن بعد دون الحاجة إلى التواجد الدائم بالقرب من الجهاز.
- الملاءمة وسهولة الاستخدام: تطبيق بسيط وسهل الاستخدام يسمح بعرض البيانات والتحكم في النظام بشكل مباشر.

3 .فريق العمل

يتكون فريق المشروع من

- **شليك نورهان**: طالبة ماستر 2 تخصص فيزياء طاقوية وطاقات متجددة. تساهم في دراسة وتصميم النظام الحراري للمجفف الشمسي، وتحليل الأداء الطاقوي، والمشاركة في إعداد الدراسة التقنية والاقتصادية للمشروع
- **ميهوبي إكرام:** طالبة ماستر 2 تخصص فيزياء طاقوية وطاقات متجددة. تساهم في تطوير الجانب التقني للمشروع، ودراسة المكونات المستعملة، والمشاركة في إعداد الدراسة التقنية والتسويقية للمشروع

يعتمد تنظيم العمل على توزيع المهام والمسؤوليات بين أعضاء الفريق وفقاً لمتطلبات المشروع، مع التعاون المستمر في مختلف مراحل التصميم والإنجاز والتقييم

كما يتولى الفريق متابعة مراحل تطوير المشروع، ودراسة احتياجات السوق، والبحث عن فرص تسويق المنتج وتطويره مستقبلاً

ويتم التواصل والتنسيق بين أعضاء الفريق من خلال الاجتماعات الدورية والتواصل المباشر ووسائل الاتصال الرقمية، مما يضمن تبادل المعلومات واتخاذ القرارات المناسبة في الوقت المناسب وتحقيق أهداف المشروع بكفاءة

4. أهداف المشروع

يهدف مشروع المجفف الشمسي الذكي إلى تطوير وتسويق حل مبتكر لتجفيف المنتجات الفلاحية باستعمال الطاقة الشمسية وتقنيات المراقبة والتحكم عن بعد، بما يساهم في تحسين جودة المنتجات المجففة وتقليل تكاليف التشغيل والمحافظة على البيئة.

على المدى القريب (1-2 سنة)، نسعى إلى استكمال تطوير النموذج الأولي للمجفف الشمسي الذكي واختباره ميدانياً لدى الفلاحين والمنتجين المحليين، مع العمل على التعريف بالمنتج وإثبات فعاليته التقنية والاقتصادية.

على المدى المتوسط (3-5 سنوات)، نهدف إلى تسويق المنتج على مستوى عدة ولايات فلاحية في الجزائر، وتوسيع قاعدة العملاء من خلال توفير حلول تجفيف ذكية تناسب مختلف المنتجات الزراعية والغذائية.

أما على المدى البعيد (أكثر من 5 سنوات)، فنطمح إلى أن يصبح مشروعنا من بين المؤسسات الرائدة في مجال أنظمة التجفيف الشمسي الذكية في الجزائر، مع تطوير نماذج جديدة وتوسيع النشاط نحو الأسواق الوطنية والإقليمية.

كما نسعى إلى تحقيق حصة سوقية معتبرة في قطاع معدات التجفيف الفلاحي من خلال تقديم منتج مبتكر يجمع بين الكفاءة الطاقوية وسهولة الاستخدام والتكنولوجيا الذكية.

5. الجدول الزمني لتنفيذ المشروع

الاعمال	الشهر1	الشهر2	الشهر3	الشهر4	الشهر5	الشهر6	الشهر 7
دراسة السوق وجمع احتياجات العملاء	✓						
التصميم الحراري والالكتروني للمجفف	✓	✓					
اختيار المكونات واعداد المخططات		✓	✓				
شراء المكونات والتجهيزات			✓	✓			
تصنيع هيكل المجفف الشمسي			✓	✓			
تركيب الحساسات والمراوح ووحدات التجكم				✓	✓		
تطوير تطبيق المراقبة والتحكم			✓	✓	✓		
تجميع النموذج الاولي					✓		
الاختبارات المخبرية وتحسين الأداء					✓	✓	
التجارب الميدانية لدى الفلاحين						✓	
اعداد خطة التسويق والملف التجاري					✓	✓	✓
عرض النموذج النهائي والانطلاق في التسويق							✓

المحور الثاني: الجوانب الابتكارية

1. طبيعة الابتكارات

يعتمد مشروع المجفف الشمسي الذكي على عدة أنواع من الابتكار، تتمثل فيما يلي

1. الابتكار التكنولوجي:

يعتمد المشروع على دمج تقنية التجفيف الشمسي التقليدية مع نظام ذكي يعتمد على إنترنت الأشياء (IoT)، حيث يتم استخدام حساسات لقياس درجة الحرارة والرطوبة وربطها بتطبيق عبر الانترنات يسمح بالمراقبة والتحكم عن بعد في المروحة ومتابعة ظروف التجفيف في الوقت الحقيقي.

2. الابتكار المتزايد :

يُعتبر المشروع تحسيناً لتقنية موجودة مسبقاً وهي المجفف الشمسي، من خلال إضافة عناصر جديدة مثل نظام التحكم الذكي، تحسين الكفاءة الحرارية عبر إضافة أحجار سوداء داخل المجمع الشمسي، وتحسين تدفق الهواء بواسطة معيقات داخلية لرفع فعالية التجفيف

3. الابتكار السوقي :

يقدم المشروع منتوجاً جديداً من حيث الاستخدام، حيث يحول المجفف الشمسي التقليدي إلى جهاز ذكي قابل للمراقبة عن بعد، مما يفتح مجالاً لتسويق هذه التقنية لفئات جديدة مثل الفلاحين والتعاونيات والمؤسسات الصغيرة في قطاع الصناعات الغذائية

2. الجوانب الابتكارية

- من المشاريع القليلة في الجزائر التي تدمج بين المجفف الشمسي الحراري وتقنيات إنترنت الأشياء (IoT) في عملية تجفيف المنتجات الفلاحية.
- يساهم في تثمين المنتجات الفلاحية وتقليل ضياعها عبر اعتماد طريقة تجفيف نظيفة ومستدامة تعتمد على الطاقة الشمسية.
- يستهدف فئة واسعة من المستهلكين تشمل الفلاحين، التعاونيات الفلاحية، والمؤسسات الناشئة في مجال تحويل المنتجات الغذائية.
- يعتمد على نظام ذكي يسمح بـ المراقبة والتحكم عن بعد لتحسين جودة وكفاءة عملية التجفيف مقارنة بالطرق التقليدية

المحور الثالث: التحليل الاستراتيجي للسوق

1. عرض القطاع السوقي

•السوق المحتمل: هو كل شخص أو مؤسسة فلاحية أو صناعية لديها منتجات قابلة للتجفيف والحفظ مثل الخضر والفواكه والأعشاب وتبحث عن وسيلة اقتصادية وفعالة لتثمينها وتقليل خسائرها بعد الجني.

•السوق المستهدف: يمكن استغلال هذا المنتج من طرف الفلاحين الصغار والمتوسطين والتعاونيات الفلاحية ووحدات تحويل وتثمين المنتجات الغذائية وكذا بعض المؤسسات الصغيرة والمتوسطة الناشطة في مجال الصناعات الغذائية التي تعتمد على عمليات التجفيف بشكل مباشر.

• تم اختيار هذا المنتج لكونه يعتمد على الطاقة الشمسية النظيفة والمتجددة ويوفر حلاً منخفض التكلفة وفعالاً لتجفيف المنتجات الفلاحية مع إمكانية تحسين الجودة وتقليل الضياع مقارنة بالطرق التقليدية.

2. قياس شدة المنافسة

1. المنافسون المباشرون: **_بعض** النماذج الأكاديمية أو الناشئة غير المسوقة تجاريًا.

_المجففات الشمسية التقليدية المحلية (بدون تحكم ذكي).

_المجففات الكهربائية الصغيرة المستخدمة في التجفيف الغذائي.

2. المنافسون غير المباشرين: **_**التجفيف التقليدي تحت أشعة الشمس (الأكثر انتشارًا بين الفلاحين).

_وحدات التبريد وحفظ المواد الغذائية كبديل للتجفيف.

_المجففات الصناعية الكبيرة الموجهة للمصانع.

3. الحصة السوقية (تقديرية): _ 70% يعتمدون على التجفيف التقليدي

_20%يستخدمون حلول كهربائية بسيطة.

_أقل من 10% يستخدمون معدات صناعية متطورة.

4. نقاط قوة المنافسين: **_** تكلفة منخفضة وسهولة الاستخدام

_توفر بعض الأجهزة الكهربائية الجاهزة في السوق.

6. **نقاط الضعف:** _ضعف جودة التجفيف وعدم التحكم في الظروف.

_خسائر في الإنتاج بسبب العوامل الخارجية.

_استهلاك طاقة مرتفع في الحلول الكهربائية.

_غياب الحلول الذكية والمراقبة عن بعد.

6. الميزة التنافسية للمشروع:

مشروع المجفف الشمسي الذكي يتميز بدمج الطاقة الشمسية مع تقنيات إنترنت الأشياء، مما يسمح بالمراقبة والتحكم عن بعد وتحسين جودة التجفيف بتكلفة منخفضة ومناسبة للفلاحين

3. الاستراتيجيات التسويقية

الاستراتيجيات التسويقية لمشروع المجفف الشمسي الذكي، فيما يلي مجموعة من الأفكار والاستراتيجيات التي يمكن الاعتماد عليها:

•**التسويق عبر وسائل التواصل الاجتماعي** : يعتبر استخدام وسائل التواصل الاجتماعي من أهم أدوات التسويق الحديثة، حيث سيتم إنشاء محتوى توعوي وحملات تعريفية على منصات مثل فيسبوك وتيك توك وإنستغرام للتعريف بالمجفف الشمسي الذكي، وشرح مزاياه للفلاحين والمنتجين الفلاحيين، مع استهداف المناطق الفلاحية بشكل خاص.

•**الترويج للفوائد والمميزات :** سيتم التركيز على إبراز فوائد المنتج مثل الاعتماد على الطاقة الشمسية النظيفة، تقليل تكاليف التجفيف، تحسين جودة المنتجات الفلاحية، وتقليل الخسائر الناتجة عن الطرق التقليدية، بالإضافة إلى ميزة التحكم والمراقبة عن بعد عبر تطبيق ذكي.(IoT)

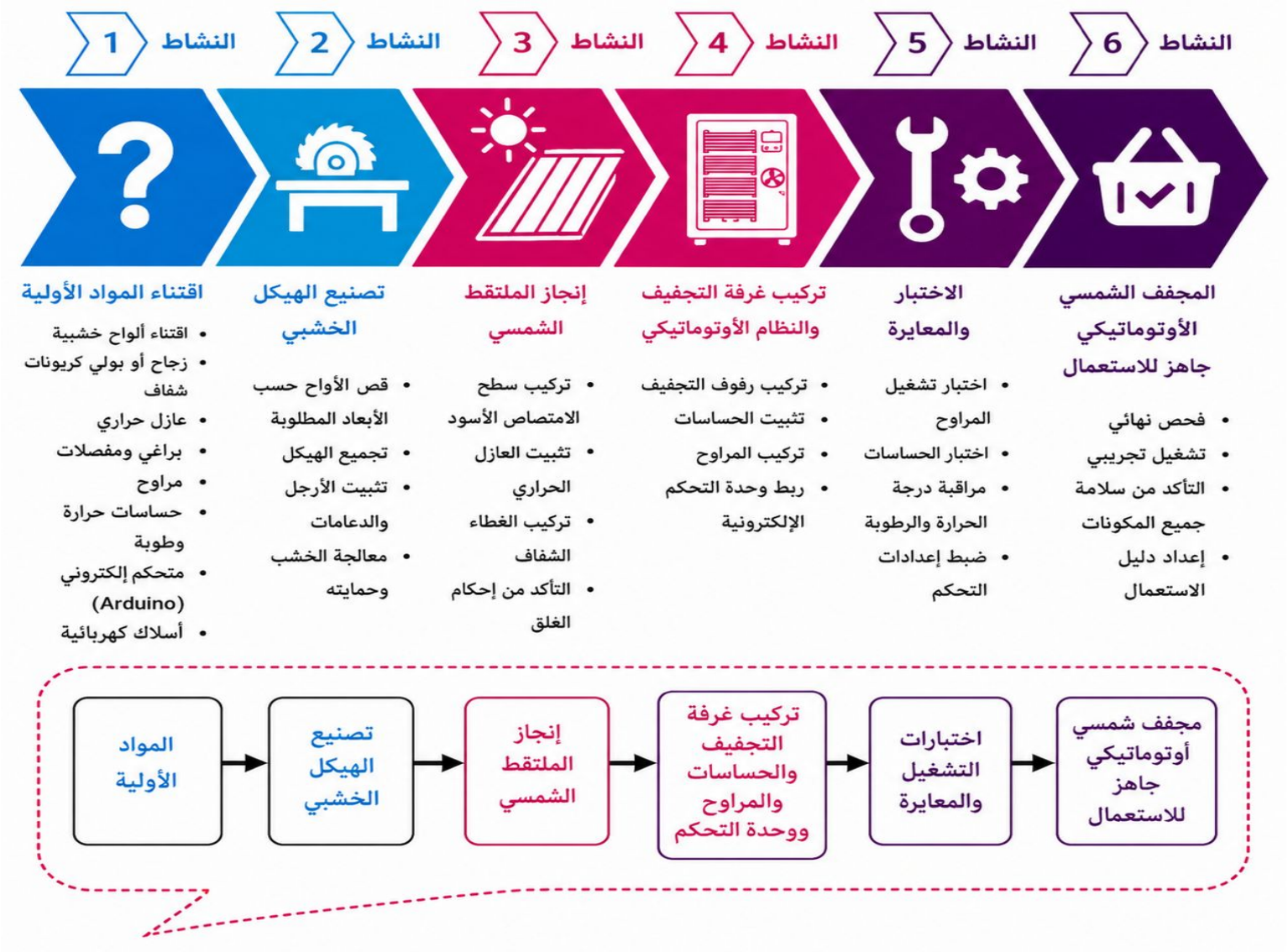
•**شراكات مع الفاعلين في القطاع الفلاحي** : يتم العمل على عقد شراكات مع التعاونيات الفلاحية، الغرف الفلاحية، والجمعيات المحلية، من أجل تسهيل إدخال المجفف الشمسي الذكي إلى السوق الفلاحي والتعريف به على نطاق واسع.

•**الحملات الترويجية والعروض الميدانية** : يمكن تنظيم عروض تطبيقية ميدانية داخل المناطق الفلاحية لعرض طريقة عمل المجفف ومقارنته بالطرق التقليدية، مع إمكانية تقديم عروض خاصة أو تخفيضات في مرحلة الإطلاق الأولى لجذب الزبائن الأوائل.

•**الابتكار والتطوير المستمر**: الحرص على تحسين النظام الذكي باستمرار من خلال تطوير التطبيق وإضافة وظائف جديدة مثل تحسين المراقبة، رفع كفاءة التجفيف، وتطوير تجربة المستخدم، بما يضمن بقاء المنتج تنافسيًا في السوق

المحور الرابع: خطة الإنتاج والتنظيم

1. عملية الإنتاج



2. التموين

- سياسة الشراء

تعتمد المؤسسة على اقتناء المواد الأولية والتجهيزات اللازمة لتصنيع المجفف الشمسي الذكي، مع التركيز على الجودة والتكلفة المناسبة. كما يتم التعامل المباشر مع أصحاب المزارع والمنتجين الفلاحيين، مما يقلل من تكاليف التموين ويمنح المشروع ميزة تنافسية.

- أهم الموردين

_ موردو الألواح الشمسية والمكونات الطاقوية.

_ موردو الحساسات والمعدات الإلكترونية.

- موردو المواد المعدنية والعازلة.

_ أصحاب المزارع والمنتجون الفلاحيون.

- سياسة الدفع ووقت الاستلام

تعتمد المؤسسة الدفع النقدي أو الدفع على دفعات حسب قيمة المشتريات، مع آجال استلام تختلف حسب نوعية التجهيزات ومصدرها.

3. اليد العاملة

من المتوقع أن يوفر المشروع في مرحلة الانطلاق من 5 إلى 6 مناصب عمل مباشرة، وهو عدد يتناسب مع طبيعة المؤسسة الناشئة واحتياجاتها الأولية في مجالات التصميم والتصنيع والتسويق والإدارة. وتشمل اليد العاملة مهندسين في الطاقات المتجددة والإلكترونيات، وتقنيين مختصين في التركيب والصيانة، بالإضافة إلى موظفين في التسيير والتسويق.

كما يمكن الاستعانة بالمناولة في بعض الأنشطة الثانوية مثل تصنيع بعض القطع المعدنية وخدمات النقل والتغليف، مما يساهم في تخفيض التكاليف وتحسين كفاءة التشغيل

4. الشراكات الرئيسية

أهم الشراكات في مشروعنا تتمثل في موردي الخشب، الزجاج، المراوح، الحساسات الإلكترونية ووحدات التحكم، حيث يساهمون في توفير المكونات الأساسية لإنجاز المجفف الشمسي الأوتوماتيكي .

كما نستفيد من مرافقة حاضنة الأعمال الجامعية التي توفر التوجيه والتكوين والدعم في مجال ريادة الأعمال، إضافة إلى التعاون مع مخابر البحث الجامعية من أجل اختبار وتحسين أداء النظام وضمان فعاليته. ويسعى المشروع كذلك إلى بناء شراكات مع الهيئات الفلاحية والتعاونيات الزراعية لتسهيل تسويق المنتج والوصول إلى الفلاحين المستهدفين، بالإضافة إلى إمكانية التعاون مع البنوك وهيئات دعم المؤسسات الناشئة لتمويل مراحل التطوير والتوسع.

المحور الخامس: النموذج الأولي التجريبي



محور السادس: خطة الإنتاج والتنظيم (BMC)

<table>
<tr>
<td rowspan="2">✓ شرائح العملاء

✓ الفلاحون الصغار والمتوسطون.
✓ CCLS التعاونيات ومراكز تخزين الحبوب والبقول .
✓ مؤسسات تحويل المنتجات الغذائية.
✓ منتجو الأعشاب الطبية والعطرية.
✓ المؤسسات الناشئة العاملة في الصناعات الغذائية.
✓ المستثمرون في القطاع الفلاحي</td>
<td>✓ العلاقة مع العملاء

✓ علاقة مباشرة: البيع، التركيب، الصيانة.
✓ علاقة غير مباشرة: التطبيق الذكي، شبكات التواصل الاجتماعي وخدمة ما بعد البيع.</td>
<td rowspan="2">✓ القيمة المقترحة

✓ مجفف شمسي ذكي للمنتجات الفلاحية والغذائية.
✓ تقليل تكاليف التجفيف باعتماد الطاقة الشمسية.
✓ مراقبة درجة الحرارة والرطوبة في الزمن الحقيقي من اجل تحسين عملية تجفيف
✓ التحكم عن بعد عبر تطبيق ذكي.
✓ تحسين جودة المنتجات وتقليل التلف والخسائر.
✓ نظام ذكي يعتمد على تقنيات إنترنت (IoT)
✓ تخزين حراري يرفع كفاءة التجفيف.
✓ حل محلي مبتكر منخفض التكلفة وصديق للبيئة</td>
<td rowspan="2">✓ الأنشطة الرئيسية

✓ تصميم المجفف الشمسي الذكي.
✓ شراء المواد الأولية.
✓ التصنيع والتجميع.
✓ برمجة وتطوير التطبيق.
✓ الاختبار وتحسين الأداء.
✓ التسويق والبيع.
✓ الصيانة وخدمة ما بعد البيع.

✓ الموارد الرئيسية

✓ المجمع الشمسي الحراري و مكونات المجفف.
✓ الحساسات الإلكترونية ووحدات التحكم.
✓ تطبيق المراقبة والتحكم الذكي.
✓ الخبرة التقنية في الطاقات المتجددة وIoT
✓ رأس المال وفريق العمل التقني</td>
<td rowspan="2">✓ الشراكات الرئيسية

✓ مورّدو الحساسات الإلكترونية ووحدات التحكم.
✓ مورّدو المواد المعدنية.
والخشب والزجاج والعوازل.
✓ حاضنة الأعمال الجامعية.
✓ مخابر البحث الجامعية.
✓ البنوك وهيئات دعم المؤسسات الناشئة.
✓ شركات تطوير التطبيقات والبرمجيات</td>
</tr>
<tr>
<td>✓ القنوات

✓ الغرف الفلاحية
✓ بيع مباشر
✓ المعارض والصالونات الفلاحية
✓ شبكات التواصل الاجتماعي</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2">✓ مصادر الإيرادات

✓ بيع المجففات الشمسية الذكية.
✓ خدمات التركيب والتشغيل.
✓ خدمات الصيانة الدورية.
✓ تحديثات وتطوير التطبيق مستقبلاً.</td>
<td colspan="3">✓ هيكل لتكاليف

✓ تكاليف ثابتة:
✓ أجور العمال، إيجار الورشة، التراخيص والإدارة، التسويق.

✓ تكاليف متغيرة
✓ الألواح الشمسية، الحساسات الإلكترونية، المراوح ووحدات التحكم، الخشب والزجاج والعوازل، النقل والتغليف، الصيانة.</td>
</tr>
</table>

المحور السابع: الخطة المالية

1. تقدير التكاليف كلية ثابتة

تكاليف ثابتة	سعر الشراء
Visseuse	7 000.00DA
منشار كهربائي	20 000.00 DA
اردوينو وملحقاته	5 000.00DA
مكملات accessoires	500.00 DA
شينيور	15 000.00 DA
الة لحام الحديد	20 000.00DA
الة لحام الكترونيك	1 500.00DA
TOTAL	69 000.00 DA

2. تقدير تكاليف المواد الأولية:

	الكمية	سعر الوحدة الواحدة	سعر الشراء الاجمالي
الأحجار	كلغ 2	100.00	200.00DA
رفوف التجفيف	2	500.00	1 000.00DA
لوح 244_144	-	-	18 500.00DA
قفل الباب والرزز	1	450.00	450.00 DA

النقل	-	-	1 400.00DA
البراغي	-	-	1 000.00DA
ايطاج	21	20.00	420.00DA
بخاخ طلاء اسود	2	400.00	800.00DA
بانتر 1كلغ اسود	1	500.00	500.00DA
رولو وفرشات	1	450.00	450.00DA
الماستيك	3	23.333	700.00DA
الزجاج	-	-	1 350.00DA
ألمينيوم الغلاف	متر5	120.00	600.00DA
العازل	3	950.00	2 850.00DA
ESP32S3	1	1800.00	1 800.00DA
DS18B28	3	600.00	1 800.00DA
DHT	1	450.00	450.00DA
5 رولي V	1	350.00	350.00DA
المروحة	1	1000.00	1 000.00DA
PLACE PCB	1	500.00	500.00DA
PCBالعناصر	-	-	680.00DA
PCB PRO	1	3000.00	3 000.00DA
العلبة الكهربائية	1	850.00	850.00DA

3. تقدير تكاليف اليد العاملة:

تسمية المنصب	عدد العمال			قيمة الأجر		
	الـ1 سنة	السنة 2	السنة3	السنة 1	السنة 2	السنة 3
المسير أو المسيرون	01	01	01	324 000.00	336 000.00	348 000.00
الإطارات (مهندسين، رؤساء المصالح، المكلفين بالتسويق، رؤساء الورشات....)	01	01	01	312 000.00	324 000.00	336 000.00
عمال التحكم (المكلفين بالمخزن، السكريتاريا....)	01	01	02	288 000.00	300 000.00	624 000.00
عمال التنفيذ (السائق الحارس، عمال النظافة....)	01	02	03	288 000.00	600 000.00	936 000.00
المجموع	4	5	7	1 212 000.00	1 560 000.00	2 244 000.00

4. تقدير الأعباء الاجتماعية:

البيان	السنة 01	السنة 02	السنة03
مصاريف الضمان الاجتماعي لغير الاجراء 15% من الربح الصافي المحقق	الحد الأدنى دج 24 000.00 (للمقاول الذاتي) مؤسسة عادية	دج28 000.00 (يتطور حسب الربح الصافي)	دج 32 000.00
مصاريف الضمان الاجتماعي للعمال 12.5%	261 000.00	274 050.00	293 233.50
المجموع	285 000.00	302 050.00	325 233.50

5. تقدير التكاليف الخارجية للمشروع:

البيان	السنة 1	السنة2	السنة3
الماء/الغاز/مصاريف الكهرباء	140 000.00	150 000.00	159 000.00
تكاليف الصيانة والتصليح	–	–	–
تكاليف الايجار	96 000.00	96 000.00	96 000.00
مصاريف تأمين العتاد والمعدات	–	–	–
مصاريف التسويق (الدعاية والإشهار)	20 000.00	20 000.00	20 000.00
تكاليف التكوين والتدريب	–	–	–
مصاريف عامة (أعباء خارجية) أخري	–	–	–
المجموع	256 000.00	266 000.00	275 000.00

6. تقدير تكاليف إهلاك الاستثمارات:

البيان	التكلفة	مدة الاهتلاك بالسنوات	معدل الاهتلاك	قسط الاهتلاك السنوي (دج)
تهيئة المحل	150 000.00	05	20%	30 000.00
العتاد المكتب	72 000.00	05	20%	14 400.00
العتاد الاعلام آلى	135 000.00	05	20%	27 000.00
عتاد الاتصالات	30 000.00	05	20%	6 000.00
المصاريف العامة المتعلقة بالإنشاء	8 000.00	05	20%	1 600.00
المبلغ الإجمالي				79 000.00

7. تقدير حجم المبيعات السنوية:

البيان	السنة 1		السنة2		السنة3	
	الكمية	المبلغ الإجمالي	الكمية	المبلغ الإجمالي	الكمية	المبلغ الاجمالي
مجفف بالطاقة الشمسية	20	3 766 250.00	40	5 955 050.00	60	7 150 918.37
المبلغ الاجمالي	دج16 617 475.87					

8. حساب النتائج السنوية:

البيان	السنة 1	السنة 2	السنة3
رقم الأعمال المشتريات المستهلكة الأعباء الخارجية	3 275 000.00 1 374 000.00 256 000.00	5 700 307.50 2 827 000.00 266 000.00	7 150 918.37 4 122 000.00 275 000.00
القيمة المضافة	**1 645 000.00**	**2 607 307.50**	**2 753 918.37**
الأجور والأعباء الاجتماعية	1 497 000.00	1 862 050.00	2 569 233.50
إجمالي فائض الاستغلال	**148 000.00**	**745 257.50**	**184 684.87**
الاهتلاك والمؤونات	79 000.00	79 000.00	79 000.00
نتائج الاستغلال	**69 000.00**	**666 257.50**	**105 684.87**
الضرائب على الشركات	10 000.00	10 000.00	10 000.00
صافي الدخل	**59 000.00**	**656 257.5**	**95 684.87**